



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO TESTOVÁNÍ LOŽISEK

DESIGN OF APPARATUS FOR TESTING OF BEARINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Sovadina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **František Sovadina**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce zařízení pro testování ložisek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro kontrolu trvanlivosti ložisek se používají jednoúčelové experimentální zařízení. Během zkoušky se zjišťuje, zda vypočtená základní trvanlivost odpovídá testovanému ložisku. Pro stávající zařízení již nejsou dostupné náhradní díly a je nutná jeho rekonstrukce s ohledem na aktuálně dostupné prvky na trhu. Návrh modifikovaného konstrukčního uspořádání stávajícího experimentálního zařízení umožní testování trvanlivosti ložisek.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je návrh rekonstrukce zařízení pro trvanlivostní testy ložisek s ohledem na snížení nákladů při změně rozměru ložiska a aktuální stav techniky.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat metody a metodiky pro stanovení trvanlivosti ložisek,
- popsat současný stav zařízení pro trvanlivostní testy ložisek,
- definovat vhodné parametry pro konstrukční řešení,
- navrhnout varianty konstrukčních uspořádání,
- zpracovat výkresovou dokumentaci vybrané varianty.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

KARACAY, T. a N. AKTURK. Experimental diagnostics of ball bearings using statistical and spectral methods. Tribology International. 2009, 42(6), 836-843. DOI: 10.1016/j.triboint.2008.11.003. ISSN 0301679X.

TANDON, N. a A. CHOUDHURY. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. Tribology International. 1999, 32(8), 469-480. DOI: 10.1016/S0301-679X(99)00077-8. ISSN 0301679X.

MATHEW, J. a R. J. ALFREDSON. The Condition Monitoring of Rolling Element Bearings Using Vibration Analysis. Journal of Vibration Acoustics Stress and Reliability in Design. 1984, 106(3), 102-107. DOI: 10.1115/1.3269216. ISSN 07393717.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V této bakalářské práci byl proveden rozbor používaných testovacích zařízení pro trvanlivostní zkoušky valivých ložisek. Tento rozbor následně slouží jako inspirace pro rekonstrukci stávajícího testovacího zařízení ložisek na FSI VUT v Brně. Byly vytvořeny tři koncepční návrhy a po zvážení všech aspektů byla vyhotovena výkresová dokumentace pro finální variantu. Její provedení povede k úspoře místa v laboratoři a snadnější manipulaci s testovacím zařízením při testech trvanlivosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Valivá ložiska, testování životnosti, rekonstrukce, testovací zařízení ložisek.

ABSTRACT

In this bachelor thesis an analysis of used test devices for durability of the rolling bearing was performed. This analysis then serves as an inspiration for the reconstruction of the existing bearing test facility at FME BUT. Three conceptual designs have been developed and, after consideration of all aspects, drawing documentation for the final variant has been produced. Its design will lead to space saving in the laboratory and easier handling of test equipment in durability tests.

KEYWORDS

Rolling bearings, fatigue testing, reconstruction, bearing test device.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOVADINA, František. *Konstrukce zařízení pro testování ložisek*. Brno, 2019, 62 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Petru Svobodovi, Ph.D za jeho čas, ochotu a cenné rady při vedení této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině přátelům za podporu během studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Valivá ložiska	14
2.1.1	Druhy valivých ložisek	14
2.1.2	Výpočet životnosti valivých ložisek	15
2.1.3	Vady a poškození ložisek	19
2.2	Diagnostika ložiskových poruch	21
2.2.1	Hluková diagnostika	21
2.2.2	Termodiagnostika	21
2.2.3	Akustické emise	22
2.2.4	Vibrodiagnostika	22
2.3	Montáž a demontáž ložiska	23
2.4	Testování trvanlivosti ložisek	24
2.4.1	Testovací zařízení Timken	24
2.4.2	Testovací zařízení FAG-FE8	25
2.4.3	Testovací zařízení PRONOSTIA	25
2.4.4	Testovací zařízení válečkové	26
2.4.5	Testovací zařízení firmy SCHAEFFLER	27
2.4.6	Testovací zařízení soudečkových ložisek	27
2.4.7	Testovací zařízení SA67	28
2.4.8	Testovací zařízení RAH a ZT	29
2.4.9	Testovací zařízení T20-60nF	30
2.4.10	Testovací zařízení na FSI VUT v Brně	30
2.4.11	Zkušební zařízení zejména pro válečková a jehlová ložiska	31
2.4.12	Zkušební zařízení pro válečková ložiska typu NU a N	31
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	32
3.1	Analýza	32
3.2	Cíle práce	32
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	33
4.1	První koncepční návrh	33
4.2	Druhý koncepční návrh	34
4.3	Třetí koncepční návrh	34
4.4	Shrnutí koncepčních řešení	35

4.5	Výběr optimálního řešení	36
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	37
5.1	Popis konstrukce testovacího zařízení ložisek	37
5.2	Ložiskový domek	38
5.2.1	Těleso ložiskového domku	38
5.2.2	Víka	40
5.2.3	Hřídel	40
5.2.4	Ložisková pouzdra	41
5.3	Uložení ložisek	41
5.4	Zatěžovací soustava	42
5.5	Motor	43
5.6	Stůl	44
5.7	Řemenový převod	45
5.8	Spojka	47
5.9	Podpurný ložiskový domek	48
5.10	Upínací desky	48
5.11	Diagnostika poškození ložisek	50
5.12	Chladicí okruh	50
6	DISKUZE	51
7	ZÁVĚR	52
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	56
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	58
11	SEZNAM TABULEK	60
12	SEZNAM PŘÍLOH	61

1 ÚVOD

V dnešní době neustálého vědeckého a technického pokroku je kladen důraz na zvyšující se kvalitu a trvanlivost zařízení. Velké množství strojů, hraček, sportovních potřeb apod. využívá pro svou funkci valivá ložiska. Při provozu valivých ložisek působí velké množství faktorů, které ovlivňují trvanlivost a způsobují různé mechanismy poškození valivých ložisek. Z tohoto důvodu je věnováno velké úsilí tomu, abychom lépe porozuměli dějům probíhajícím uvnitř kontaktu mezi dvěma valivými tělesy a byly minimalizovány dopady na poškozování valivých ložisek. Vizuální kontrola ložisek požaduje vyřazení stroje z provozu a jeho rozebrání a následná zpětná montáž stroje je velmi nákladná a časově náročná.

Proto se pro zjišťování stavu ložisek obracíme na metody zkoumání, které můžeme provádět nejlépe za provozu stroje. Mezi tyto metody řadíme např. vibrodiagnostiku, akustické emise, výpočty metody konečných prvků aj. Nejčastěji je prováděno experimentální ověření parametrů již vyrobených ložisek. K tomu nám slouží speciálně zkonstruovaná testovací zařízení, která umožňují v krátkém času ověření parametrů důležitých pro validaci trvanlivosti ložiska. V těchto zařízeních se nejčastěji pro zjištění vad ložisek používá vibrodiagnostika.

Tato práce se zabývá rekonstrukcí experimentálního testovacího zařízení ložisek, které se využívá pro trvanlivostní zkoušky radiálních válcových ložisek.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Valivá ložiska

Termínem valivá ložiska se označují strojní součásti, které slouží k přenášení zatížení prostřednictvím valivých prvků odvalujících se téměř bez skluzu. Tření působící při rozběhu valivých ložisek je dvakrát větší než při chodu valivých ložisek, a závisí na zatížení, rychlosti otáčení a na viskozitě maziva. (1)

Dnes se při konstruování různých strojů konstruktér nemusí zabývat navrhováním valivých ložisek ve srovnání s navrhováním jiných strojních součástí, protože valivá ložiska jsou vyráběna v normalizovaných rozměrech. Konstruktérovi stačí navrhovat ostatní součásti tak, aby se dané ložisko, které má předepsané rozměry, dalo umístit do navrhované součásti, a aby bylo schopno přenést dané zatížení s požadovanou životností. Při výběru valivých ložisek musíme brát do úvahy i provozní podmínky (teplotu, únavové zatížení, kinematiku ložiska, vlastnosti materiálu, způsob mazání, výrobní tolerance, montáž, vlastní provoz a náklady). (1)

2.1.1 Druhy valivých ložisek

Při vypracování této bakalářské práce budou pro základní pochopení problému zmíněny pouze některé typy ložisek. Výrobci ložisek vyrábějí velké množství různých druhů ložisek, které jsou pak publikovány v katalogích.

Valivá ložiska jsou konstruována tak, aby mohla přenášet radiální zatížení nebo axiální zatížení, případně kombinaci radiálního a axiálního zatížení. (1)

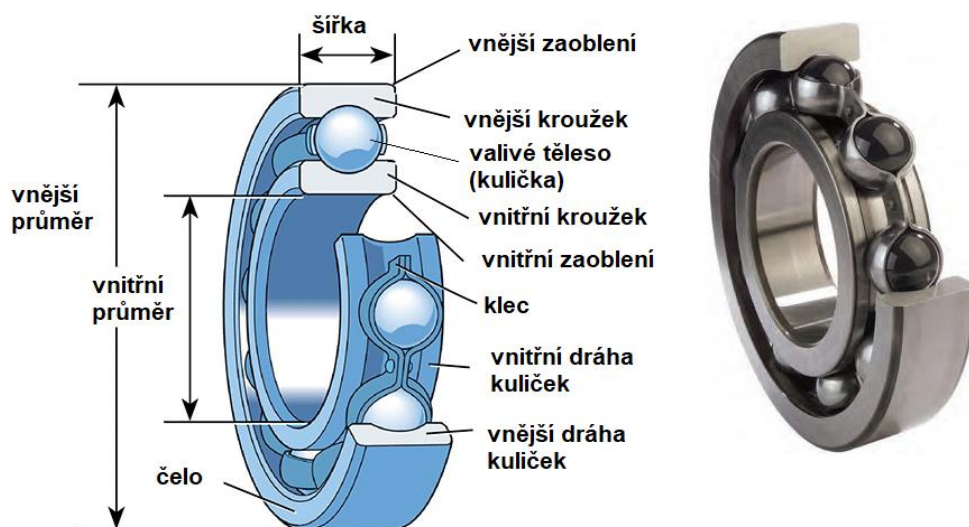
Valivá ložiska rozdělujeme podle použitého valivého elementu a podle přenášeného zatížení na:

- Kuličková ložiska
- Radiální válečková ložiska
- Kuželíková ložiska
- Soudečková ložiska
- Jehlová ložiska
- Axiální kuličková ložiska

Valivá ložiska se vyrábí s krytem na jedné straně, na obou stranách nebo bez krytu. Těsnění ložisek z plechu neuzavírají ložiska dokonale, ale do určité míry zabraňují vnikání nečistot do ložiska. (1) Při použití těsnění z nitrilové pryže vytvářejí spolehlivější ochranu pro vnikání nečistot do ložisek. (2)

Při montáži ložisek na hřídele může dojít k nesouososti uložení a průhybu hřídele. U velkých nesouosostí je třeba užít naklápěcích ložisek. Pro velmi malé nesouososti a průhyby hřídelí mohou být použita i jednořadá kuličková ložiska.

Všechny druhy ložisek mají společné čtyři základní části – vnější a vnitřní kroužek, klec a valivá tělesa (Obr. 2-1).



Obr. 2-1 Kuličkové ložisko (22)

Vnitřní kroužek je uložen (nalisován) na hřídel a drážka na vnějším průměru vnitřního kroužku slouží jako vnitřní dráha valivých těles, které jsou uleženy v kleci. Klec zajišťuje dodržování vzdálenosti mezi jednotlivými valivými tělesy. Vnější kroužek bývá uložen do ložiskového pouzdra montážního celku. Valivá tělesa jsou uložena v kroužku s oběžnou dráhou a přenášejí zatížení z vnějšího kroužku na valivé těleso a z valivého tělesa na vnitřní kroužek.

2.1.2 Výpočet životnosti valivých ložisek

Při provozu ložiska vzniká mezi valivými elementy a drahami vnějšího a vnitřního kroužku kontaktní napětí. Jelikož tvary stykových ploch v radiálním a v axiálním směru nejsou stejné, nelze postupovat podle Hertzovy rovnice kontaktního napětí a ani podle Smith-Lianovi rovnice. Jejich tvary by byly pro tento případ velmi složité. (1)

Pokud je ložisko při provozu náležitě mazáno, správně namontováno a utěsněno proti vnikání nečistot, tak při provozu za normálních teplotních podmínek bývá příčinou poruchy ložiska pouze kontaktní únava materiálu. (1)

K únavě materiálu dochází po milionech zatěžovacích cyklů, proto je potřeba životnost (dále jen trvanlivost) ložisek hodnotit kvantitativně. Norma ISO 281:2007 stanovuje trvanlivost ložiska v počtu otáček nebo počtu provozních hodin při stálém zatížení, při kterém se úrava projeví odlupováním materiálu. (1) (3)

Trvanlivost ložiska je stochastická veličina, tedy má statistické rozdělení se statickými parametry. (1)

Výrobci ložisek používají k výpočtu tzv. základní (výpočtovou) trvanlivost L_{10} , která udává předpokládanou hodnotu životnosti založenou na radiální dynamické únosnosti nebo na axiální dynamické únosnosti, přiřazené k 90 % spolehlivosti. Základní trvanlivost L_{10} je platná pro ložiska vyrobená z běžných ložiskových materiálů a pro obvyklé provozní a výrobní podmínky. Ne vždy, můžeme dodržet optimální podmínky výroby a provozu. Pro tyto případy používáme tzv. modifikovanou (výpočtovou) trvanlivost, která vyjadřuje základní (výpočtovou) trvanlivost pro jinou spolehlivost než 90 % nebo pro jiný (neobvyklý) materiál ložisek a jiné provozní podmínky. (1)

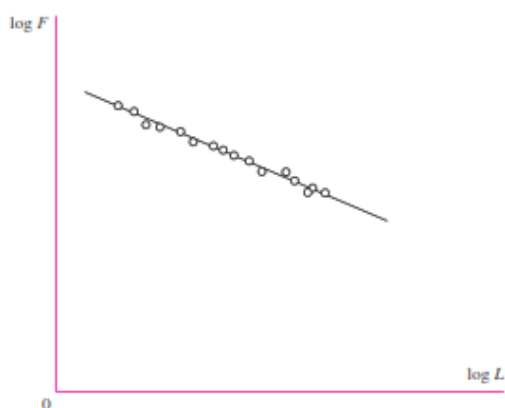
Vztah mezi zatížením a trvanlivostí při dané spolehlivosti

Obrázek 2-2 znázorňuje experimentálně získanou závislost zatížení F na základní trvanlivosti L (pro 90 % spolehlivost) zobrazené v logaritmickém měřítku. Použitím lineární regrese obdržíme vztah (2.1)

$$FL^{1/a} = konst. \quad (2.1)$$

$$F_1 L_1^{1/a} = F_2 L_2^{1/a} \quad (2.2)$$

Kde veličina a závisí na použití druhu valivého ložiska. Pro kuličková ložiska s bodovým stykem, $a = 3$, pro válečková, kuželíková, soudečková ložiska s čárovým stykem, $a = 10/3$.



Obr. 2-2 Závislost mezi zatížením a trvanlivostí valivého ložiska v logaritmickém měřítku (1)

Výrobci ložisek používají smluvní hodnotu počtu otáček odpovídající základní (radiální či axiální) dynamické únosnosti každého ložiska uvedeného v katalogu výrobce. Tato hodnota činí 10^6 otáček a jedná se o za základní (výpočtovou) trvanlivost L_{10} . „V důsledku toho ISO 281:2007 definuje základní radiální (axiální) dynamickou únosnost jako stálé bodové radiální (stálé středové axiální) zatížení, které může ložisko teoreticky přenášet při základní výpočtové trvanlivosti 10^6 otáček.“ (1)

Veličinu základní radiální (axiální) dynamické únosnosti značíme C_r (C_a) podle ISO 281:2007. V katalozích výrobců se můžeme střetnout s označením C_{10} nebo C , které bude použito v této bakalářské práci. Základní dynamická únosnost je vyjádřena v newtonech (N).

Pokud v rovnici (2.2) nahradíme zatížení F_1 za základní dynamickou únosnost C , za základní trvanlivost L_1 dosadíme základní výpočtovou trvanlivost L_{10} a za L_2 dosadíme základní požadovanou trvanlivost, dostáváme vztah (2.3).

$$C(L_R N_R 60)^{1/a} = F_D(L_D N_D 60)^{1/a} \quad (2.3)$$

- C - základní dynamická únosnost (N)
- L_R - základní výpočtová trvanlivost (h)
- n_R - jmenovitá frekvence otáčení (min^{-1})
- F_D - požadované radiální zatížení (N)
- L_D - požadovaná základní trvanlivost (h)
- n_D - požadovaná frekvence otáčení (min^{-1}) (1)

Kombinované zatížení

Při provozu valivého ložiska, je ložisko současně zatěžováno radiálním a axiálním zatížením nabývajících různých hodnot. Proto je nutno zavést tzv. ekvivalentní radiální (axiální) zatížení P , které zahrnuje kombinované zatížení ve výpočtu trvanlivosti a nahrazuje ho jednotným bodovým zatížením, které má stejný účinek jako skutečné radiální a axiální zatížení.

Pokud při provozu na ložisko působí radiální a axiální zatížení, lze použít pro výpočet ekvivalentního zatížení vztah (2.4) (1)

$$P = X F_r + Y F_a \quad (2.4)$$

- P - ekvivalentní dynamické zatížení (N)
- X - součinitel radiálního dynamického zatížení ($-$)
- F_r - radiální zatížení ložiska (N)
- Y - součinitel axiálního dynamického zatížení ($-$)
- F_a - axiální zatížení ložiska (N) (4)

Součinitele radiálního a axiálního zatížení X a Y závisí na poměru axiálního a radiálního zatížení F_a/F_r . Podle tohoto poměru pak z katalogu výrobce odečteme hodnoty součinitelů X a Y . (1)

Rovnice základní trvanlivosti

Norma ČSN ISO 281 stanovuje základní trvanlivost přiřazenou 90% spolehlivosti vyrobeného ložiska z běžně užívaného materiálu vysoké kvality, běžné výrobní kvality při normálních provozních podmínkách. (4)

Základní trvanlivost můžeme vyjádřit počtem celkových otáček (2.5) nebo počtem celkových hodin (2.6).

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^a \quad (2.5)$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^a \frac{10^6}{60 \cdot n} \quad (2.6)$$

Koeficienty a jsou stejné jako v případě vztahů (2.1), (2.2).

Modifikovaná trvanlivost

Norma ČSN ISO 281 stanovuje modifikovanou trvanlivost přiřazenou 90% nebo jiné spolehlivosti nebo na jiné provozní podmínky (speciální vlastnosti, kontaminované mazivo, neobvyklé provozní podmínky). (4)

Pro stanovení trvanlivosti je potřeba přepočítat základní trvanlivost dle vztahu (2.7). (4)

$$L_{nm} = a_1 a_{ISO} L_{10} \quad (2.7)$$

- L_{nm} - modifikovaná trvanlivost (10^6 ot.)
- a_1 - koeficient spolehlivosti pro jinou než 90% spolehlivost $(-)$
- a_{ISO} - koeficient materiálu, maziva, technologie výroby a provozních podmínek $(-)$
- L_{10} - základní trvanlivost (10^6 ot.)

2.1.3 Vady a poškození ložisek

U většiny valivých ložisek dochází k poškození ještě během předpokládané životnosti ložiska, tudíž dochází k jeho předběžnému vyřazení z provozu i předčasnému vyřazení z testovacího souboru pro testování životnosti. Důvody vzniku závad ložiska mohou být:

- Nedostatečné mazání
- Nesprávně zvolený typ ložiska (radiální – axiální)
- Vniknutí nečisto do ložiska
- Elektrokoroze
- Nesprávná instalace do zařízení
- Průchod elektrického proudu přes ložisko
- Vibrace
- Koroze

Pitting



Obr. 2-3 Dráha vnějšího kroužku – Pitting (21)

Pitting je únavový jev, který nastává při opakovaném valení těles. Pitting se projevuje růstem trhlin v určité hloubce pod povrchem v důsledku působení tzv. kontaktního napětí, jehož hlavní tlaková a smyková napětí dosahují maxima v této hloubce. Při stálém působení kontaktního napětí trhliny rostou, až se částčky materiálu odloupnou. (1)

Otlačení

K otlačení dochází v důsledku přetížení ložiska nebo protočení ložiska v uložení stoje. (5)



Obr. 2-4 Axiální přetížení soudečkového ložiska (21)

Opotřebení



Obr. 2-5 Hnědé plochy způsobené nedostatečnou vrstvou mazacího filmu (21)

Opotřebení ploch ložisek nastává při nedostatečném mazání nebo selhání systému mazání. Nedostatečné mazání může být způsobeno např. insuficientní tloušťkou mazacího filmu způsobenou nedostatečnou viskozitou maziva. (5)

Koroze

Povrch ložisek může začít korodovat při nedodržení ochrany proti vnikání vlhkosti na povrch ložiska, např. při nesprávném skladování ložiska. Ke korozi může dojít i použitím nevhodného maziva.



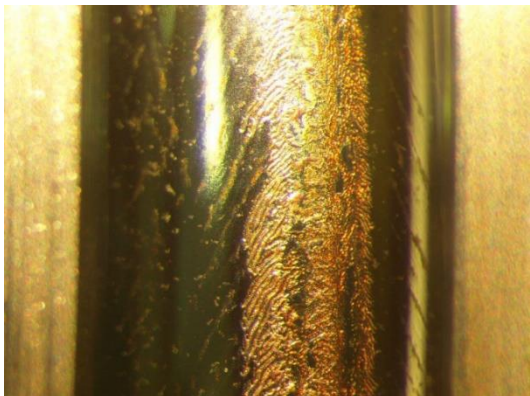
Obr. 2-6 Koroze (21)

U ložisek použitých na elektromotorech může dojít nesprávným provedením elektroizolace k elektrokorozi. Ta způsobuje pitting při průchodu elektrickým proudem.



Obr. 2-7 Vnitřní kroužek – elektrokoroze (21)

Pokud se při provozu stroje vyskytují velké vibrace, na ložiskách najdeme tzv. vibrační korozi.



Obr. 2-8 Vibrační koroze (21)

2.2 Diagnostika ložiskových poruch

Při revizi strojů jejichž součástí jsou valivá ložiska se sleduje počet hodin nebo otáček vykonaných daným strojem, zda nepřekračuje životnost namontovaného ložiska. Dále jsou sledovány poruchy ložisek pomocí různých diagnostických metod, které jsou popsány v další kapitole této bakalářské práce.

2.2.1 Hluková diagnostika

Za hluk je pokládán nežádoucí zvuk ve frekvenčním rozsahu $20\text{ Hz} - 20\text{ kHz}$. Hluk může být způsoben odvalováním valivých elementů přes poškozené místo, které způsobují vibrace. Další možnou příčinou hluku je přítomnost nevyvážených elementů ložiska. (6)

Hluk měříme pomocí zvukoměru, který se skládá z mikrofonu zachytávajícího hladinu akustického tlaku. (6)

2.2.2 Termodiagnostika

Při provozu ložiska může z důvodu velkého tření součástí a jiných procesů vznikat teplo, které mazivo není schopno dostatečně rychle odvádět. Pro snímání teploty používáme termografickou metodu, která je založena na snímání tepelného pole a jeho následného vyhodnocení. Pro zobrazení tepelného pole součástí se používá termografická kamera. Základem termografie je snímání diferencí snímané plochy, díky kterým může být lokalizováno místo vady. Po porovnání s referenčními hodnotami je pak možné diagnostikovat poruchový stav ložiska. (6)

2.2.3 Akustické emise

Při současném působení vnitřních a vnějších sil dochází v součásti k uvolňování energie v ohnisku akustické emise. Jev akustické emise popisuje uvolňování energie v lokálních zdrojích struktur materiálu v podobě elastických napěťových vln, které vznikají při uvolňování mechanického napětí. Ohniska elastických vln mohou být nehomogenity materiálu či styk kontaktních ploch ve valivém ložisku. Dalšími ohnisky elastických vln mohou též být kavitace v lopatkových strojích a degradace materiálu. Vzniklá vlna se šíří materiálem až k rozhraní tělesa, kde dochází k jejímu částečnému odražení, a zbytek se transformuje na tzv. Rayleighovou povrchovou vlnu a částečně na Lambovu deskovou vlnu. Tyto transformované vlny mají rozdílnou rychlost šíření, která je ve frekvenčním pásmu $100\text{ kHz} - 4\text{ MHz}$. Toto frekvenční pásmo je snímáno pomocí snímačů AE, které zaznamenávají dislokace materiálu až do 10^{-14} m , a převádějí vlny na elektrický signál. Tato metoda akustické emise je vhodná pro nepřetržité sledování ložisek. Nevýhodou této metody jsou dosud neobjasněné příčiny vzniku akustických vln, které jsou ovlivněny tvarem a povrchem tělesa. Při vyhodnocování je důležité rozlišit nežádoucí signál od šumu. (7)

2.2.4 Vibrodiagnostika

Mechanické vibrace můžeme podle normy ČSN ISO 2041 též nazývat mechanickými kmity vybuzenými vnitřní nebo vnější silou. Hmotné body vychýlené touto silou konají vratný pohyb kolem rovnovážné polohy. Velikost vibrací závisí na velikosti budící síly, směru a kmitočtu. Vibrace též závisí na technickém stavu zařízení a jeho dílčích součástí. Vibrace lze v daném časovém okamžiku popsat pomocí fází a amplitudy, a mohou mít periodický, neperiodický nebo zcela náhodný průběh. Pokud vibrace mají periodický průběh nazýváme tyto vibrace harmonickými. A u těchto harmonických veličin stačí zjistit jednu z veličin vibrací a pro zjištění dalších veličin můžeme použít matematických vztahů. Při přítomnosti dvou a více harmonických vibrací s rozdílnou počáteční fází zjistíme jejich fázový posun jako rozdíl fází těchto harmonických vibrací. (7)

Pro měření vibrací používáme tzv. snímače neboli senzory, které snímající hodnoty výchylky, rychlosti a zrychlení vibrací. Snímače používané pro měření vibrací vůči vztyčnému bodu se nazývají relativní, a snímače pro měření vůči gravitačnímu poli absolutní.

Při měření součástí jsou získané průběhy všech vibrací porovnány s normou ČSN ISO 10816, která obsahuje data naměřená na stroji v bezporuchovém stavu. (7)

Pro zjištění závady ložiska je třeba znát jeho rozměry. Tyto rozměry se vloží do vzorců pro zjištění poruchové frekvence. Ze vzorců můžeme vypočítat poruchovou frekvenci a zjistit na kterém elementu ložiska se vada nachází. (7)

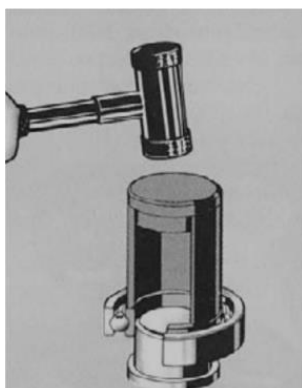
Tato metoda neslouží pro přesné stanovení závady ložiska, ale pouze k nalezení součásti na které se porucha nachází.

2.3 Montáž a demontáž ložiska

Pro chod ložisek je třeba dodržet předepsané tolerance uložení ložisek. Pro dodržení těchto tolerancí je nutno dodržovat jak předepsané pracovní postupy montáže nových ložisek, tak i postupy pro jejich demontáž, respektive výměnu starých ložisek za nové. Při montáži i demontáži ložisek se používají obdobné metody pracovních postupů:

- Mechanická metoda
- Hydraulická metoda
- Metoda tlakového oleje
- Nahřívací metoda (8)

Každý výrobce ložisek dodává pracovní postupy pro montáž a demontáž jejich typů ložisek.



Obr. 2-9 Mechanická metoda (8)



Obr. 2-10 Zařízení pro indukční ohřev (8)

2.4 Testování trvanlivosti ložisek

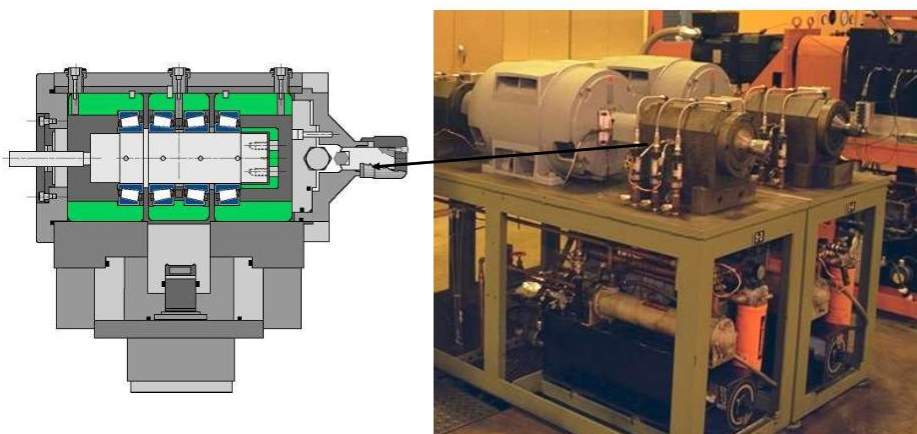
Pro stanovení trvanlivosti ložiska a dynamické únosnosti, musí každý výrobce ložisek provádět experimentální měření trvanlivosti nových typů ložisek. (9)

Pro provedení experimentu ke stanovení trvanlivosti ložiska je nutno mít dostatečný počet ložisek (20 ks) pro statistické vyhodnocení experimentu. Před samotným zkoušením se musí provádět záběh testovaných ložisek. Během experimentu je nutno sledovat správné působení zatížení, vibrace a teplotu. Zkoušení trvanlivosti ložisek je ukončeno, pokud ložiska vykazují poruchy způsobené kontaktní únavou. Při vykazování jiné poruchy než kontaktní únavou je dané ložisko vyřazeno ze statistického souboru měření. Pokud během testování trvanlivosti selže větší počet ložisek, je testování ukončeno jako nevyhovující trvanlivost ložisek. Po ukončení testu trvanlivosti jsou výsledky testu porovnány s vypočtenou základní trvanlivostí. Statistické měření používá Weibullovo rozdělení pravděpodobnosti. (9)

Doba trvání experimentu se pohybuje v rozmezí 300 – 1000 hodin v závislosti na výrobní kvalitě ložiska a na dodržení předepsaných montážních předpisů. (7)

2.4.1 Testovací zařízení Timken

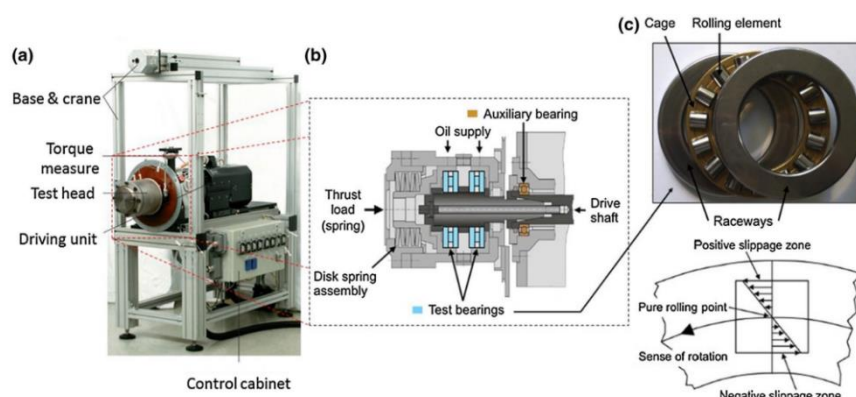
Testovací zařízení používající firmou Timken je konstruováno pro dvě testovací kuželová ložiska a dvě podpůrná ložiska. Radiální zatížení je vyvozováno pomocí hydraulického systému umístěného na spodní části ložiskového domku přímo na střední dvě sledovaná ložiska (obr.2.12). Zbylé dvě krajní ložiska slouží jako podpůrná ložiska. Mazání ložisek je zajištěno přívodem oleje pomocí maznic umístěných na vrchní části stroje.



Obr. 2-11 Testovací zařízení firmy Timken (23)

Pro zjišťování vad ložisek se používají snímače vibrací a snímače kroutícího momentu. (10)

2.4.2 Testovací zařízení FAG-FE8

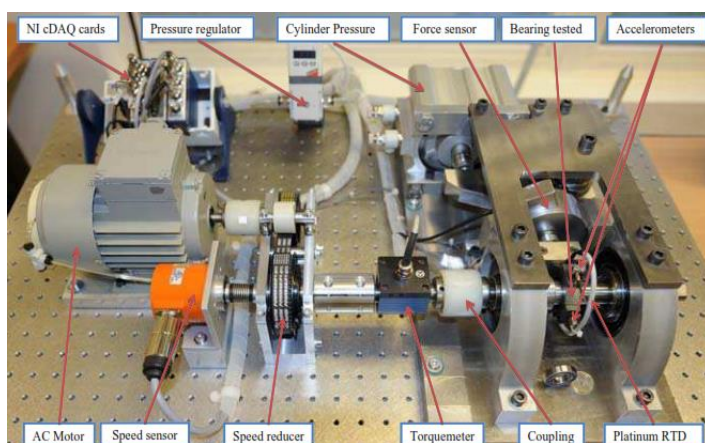


Obr. 2-12 Testovací zařízení axiálních ložisek FAG-FE8 (11)

Testovací zařízení FAG-FE8 je určeno pro testování axiálních ložisek. Axiální zatížení je přenášeno přes talířové pružiny k axiálním ložiskům (Obr. 2.13). Mazání je realizováno vrchním přívodem oleje do ložiskového domku.

Pro zjištění vad ložisek u tohoto zařízení používán vibrační snímač. Dále je používán také snímač tlaku – po určité době se ložiska vyjmou ze zařízení a pozorují se na posouzení kontaktního Hertzova tlaku. (11)

2.4.3 Testovací zařízení PRONOSTIA



Obr. 2-13 Testovací zařízení PRONOSTIA (12)

Zařízení Pronostia je určeno pro testování ložisek malých rozměrů. Konstrukce tohoto zařízení umožňuje měnit směr otáčení hřídele. Zatížení je pak vyvoláváno pneumatickým válcem pomocí elektricko-pneumatického regulátoru (obr. 2.14) (12)

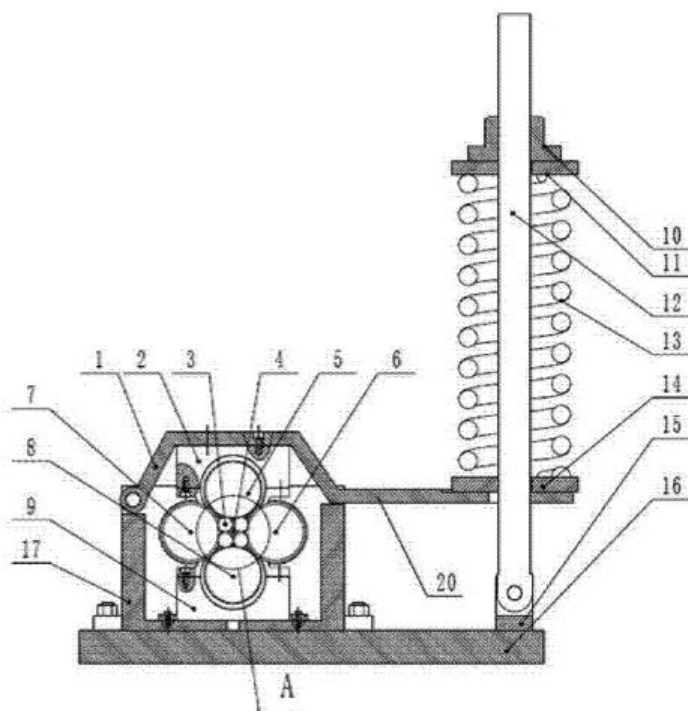
Při testování trvanlivosti ložisek jsou použity snímače vibrací a teploty (RTD platinový PT100 teplotní snímač). Způsob mazání není ve zdroji uveden. (12)

2.4.4 Testovací zařízení válečkové

Válečkové testovací zařízení používá k vyvozování síly několik válců naskládaných po obvodu ložiska. Tímto je dosaženo zvýšení počtu kontaktních míst na 4 body oproti působení v jednom místě, které se vyvozuje pomocí tlaku válce na ploše ložiska. Při použití vícebodového styku na povrch ložiska budou výsledky trvanlivosti přesnější. (13)

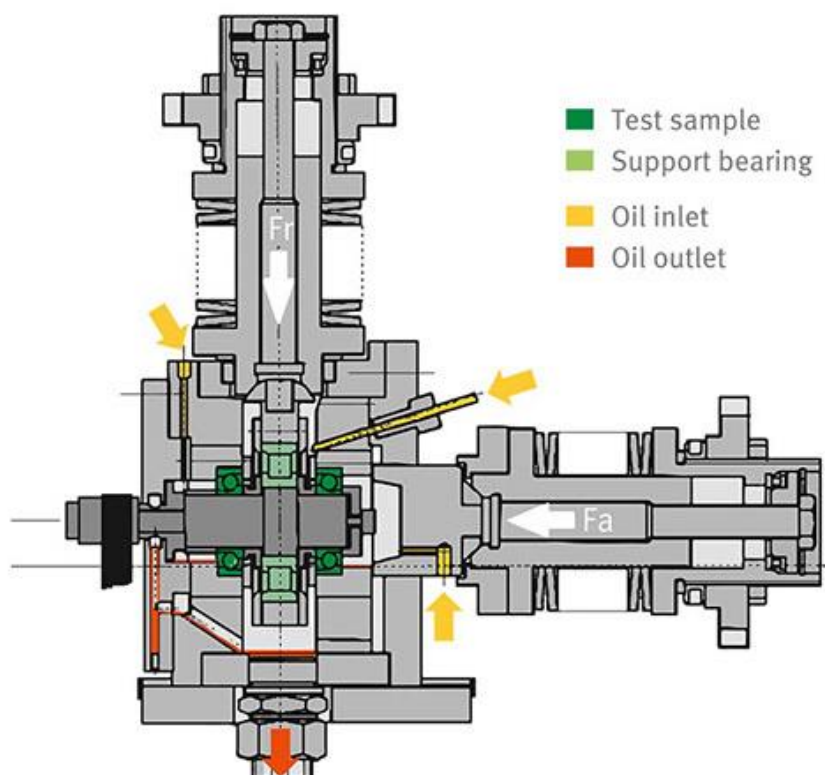
Testovací zařízení je schopno vyvinout velkou rychlost otáčení ($22\,500\text{ ot/min}$) a vyvinout velké radiální zatížení až na kontaktní zatížení o velikosti 4 GPa . Test životnosti je účinný při dosažení vyššího počtu cyklů než $1 \cdot 10^7$ cyklů. Během testu je poškození ložisek sledováno teplotními snímači a vibračními snímači. Způsob mazání není ve zdroji specifikován. (13)

Výhodou tohoto zařízení je jeho nízká výrobní cena, jednoduchá konstrukce, jednoduchost ovládání a vysoká spolehlivost. (13)



Obr. 2-14 Testovací zařízení válečkové (13)

2.4.5 Testovací zařízení firmy SCHAEFFLER



Obr. 2-15 Testovací zařízení firmy Shaeffler (14)

Testovací zařízení bylo vyvinuto firmou Shaeffler pro testování nových typů ložisek pro převodovky, které zvládají přenášení velkých radiálních i axiálních zatížení. Zařízení také umožňuje testování ložiska na radiální a axiální zatížení současně. (14)

Zatížení v radiálním i v axiálním směru je vyvozováno stlačováním talířových pružin pomocí stahovacího šroubu. Odkud je pak zatížení přenášeno na povrch ložiska. (14)

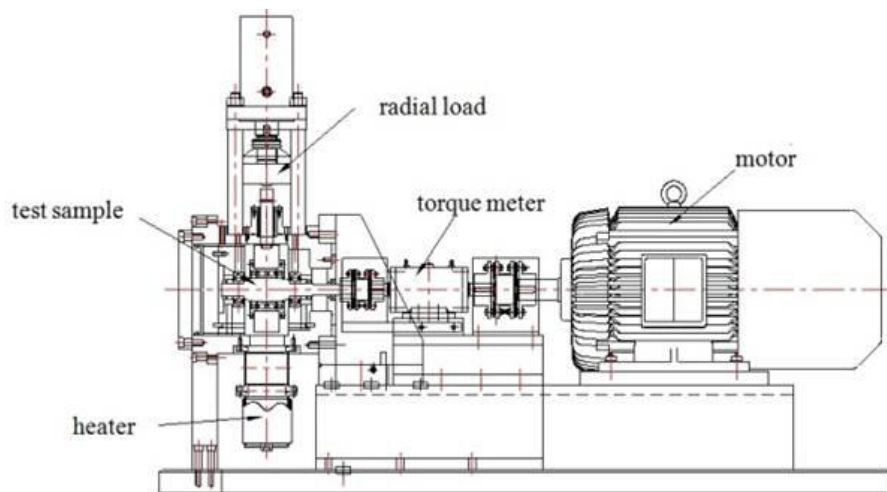
Snímače monitorování vad ložisek nejsou ve zdroji specifikovány. Mazání je realizováno pomocí přívodů oleje viz Obr. 2.16.

2.4.6 Testovací zařízení soudečkových ložisek

Zatížení je uzpůsobeno pro testování soudečkových ložisek, kde radiální zatížení je vyvozováno pomocí hydraulického válce. (15)

Pro zjištění poškození ložisek je zde použito vibračních snímačů a také se zde měří hluk vzniklý při testování ložisek. (15)

Způsob mazání bohužel není ve zdroji specifikován.



Obr. 2-16 Zařízení pro testování soudečkových ložisek (15)

2.4.7 Testovací zařízení SA67

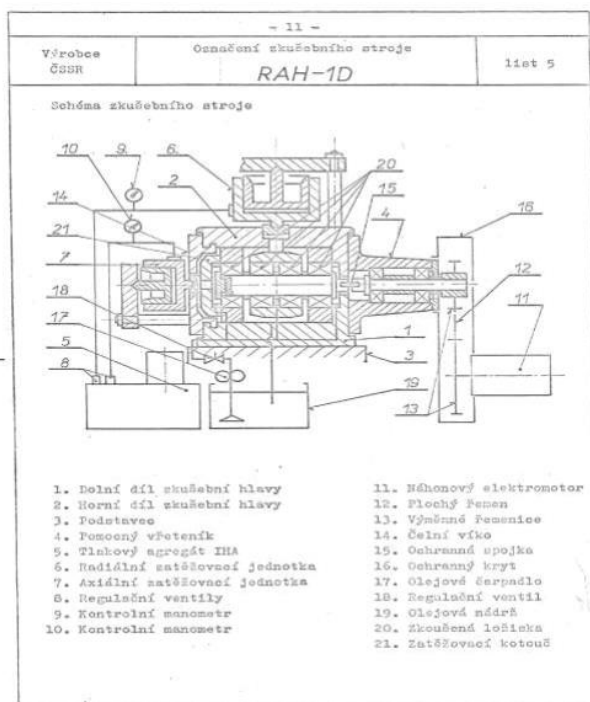
Testovací zařízení SA67 slouží pro trvanlivostní zkoušky radiálních ložisek prováděné na VUT FSI v Brně. V zařízení je uloženo jedno testovací ložisko a dvě podpůrná ložiska. Zatížení je vyvozováno hydraulickým válcem až do zatížení 8 *kN*. Zařízení je vybaveno vibračními snímači (ASC-062/T1/050/0), teplotními snímači a snímači akustické emise. Mazání je prováděno ručním otevření ventilu připojeného k olejové lázni.



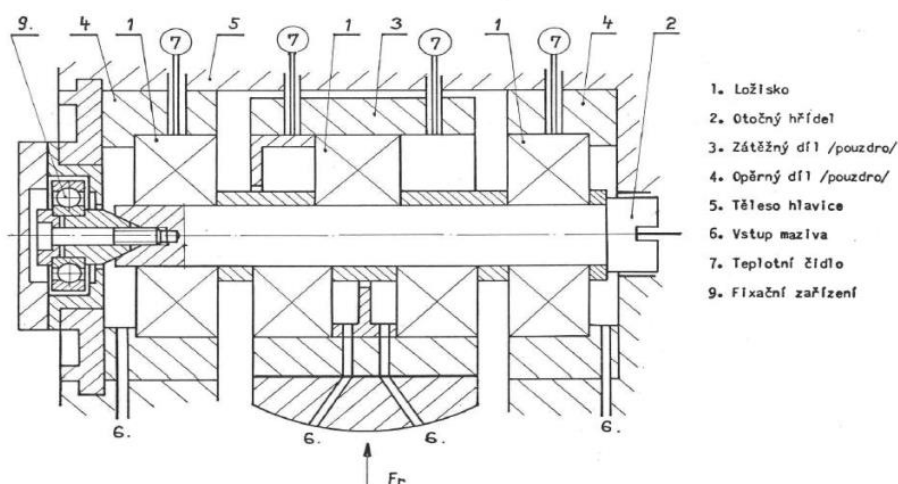
Obr. 2-17 Testovací zařízení SA67

2.4.8 Testovací zařízení RAH a ZT

Testovací zařízení RAH a ZT používá výrobce ložisek ZKL. Pro zjištění vad ložisek se používají teplotní snímače oleje. Kromě toho výrobce využívá i vibrační snímače. U RAH je zatížení vyvozováno horním hydraulickým pístem, u ZT je zatížení realizováno hydraulickým pístem umístěným na spodní straně ložiskového domku. Mazání ložisek je prováděno pomocí olejového agregátu. (16)



Obr. 2-18 Testovací zařízení RAH (16)



Obr. 2-19 Testovací zařízení ZT (16)

2.4.9 Testovací zařízení T20-60nF

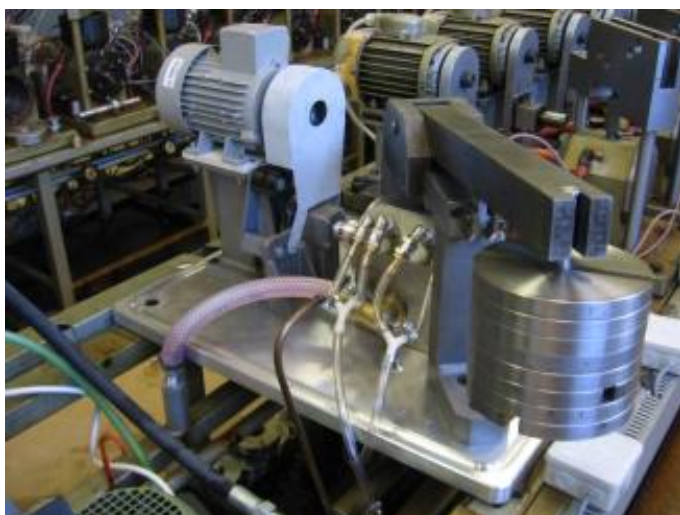


Obr. 2-20 Testovací zařízení T20-60nF (17)

Toto zařízení slouží pro trvanlivostní zkoušky jak pro radiální, tak i axiální zatížení. Radiální zatížení je vyvoláváno hydraulickým válcem. Přístroj je vybaven teplotními snímači a snímači akustické emise. Dále jsou na zařízení umístěny vibrační snímače. Způsob mazání není ve zdroji specifikován. (17)

2.4.10 Testovací zařízení na FSI VUT v Brně

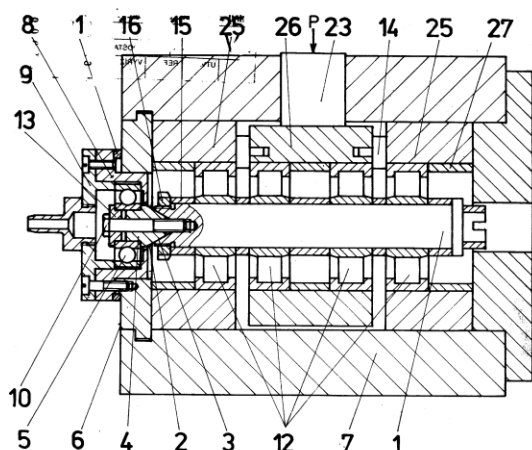
Zařízení je konstruováno pro testování životnosti čtyř ložisek, kdy radiální zatížení je realizováno pákovým systémem. Pro měření vad ložisek je používáno vibračních snímačů a snímačů akustické emise. Mazání ložisek je prováděno olejovými přírady na každé ložisko zvlášť, které jsou připojeny na čerpací jednotku, a výška maziva je regulována pomocí natočení šroubení nahoru nebo dolů. (7)



Obr. 2-21 Testovací zařízení na FSI VUT v Brně (7)

2.4.11 Zkušební zařízení zejména pro válečková a jehlová ložiska

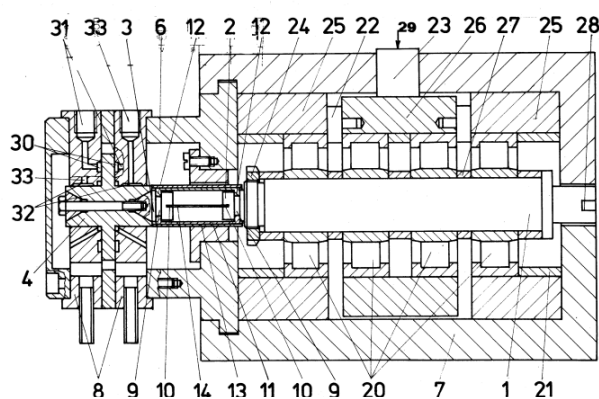
Zařízení se používá pro ověření spolehlivosti a provozních parametrů až čtyř válečkových nebo jehlových ložisek. Ložiska jsou umístěna do výměnného zatěžovacího pouzdra, což umožňuje testování ložisek různých velikostí. Zatížení ložisek je radiální, ale způsob zatěžování ve zdroji není uveden. Stejně tak není ve zdroji bohužel uveden použitý způsob chlazení. (18)



Obr. 2-22 Zkušební zařízení pro válečková a jehlová ložiska (18)

2.4.12 Zkušební zařízení pro válečková ložiska typu NU a N

Toto zkušební zařízení se používá pro ověření spolehlivosti a provozních parametrů až čtyř jehlových ložisek a nebo válečkových ložisek typu N a NU. Zařízení je podobné konstrukce jako v 2.4.11, má ale implementován navíc unašec pro axiální zajištění hřídele při testování radiálně volných typů ložisek. Zatížení ložisek je radiální, ale způsob zatěžování ve zdroji není uveden. Ve zdroji taktéž není uveden použitý způsob chlazení. (19)



Obr. 2-23 Zkušební zařízení pro ložiska (19)

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza

Pro kontrolu trvanlivosti ložisek se na ústavu konstruování používá jednoúčelové experimentální zařízení SA67 (obr. 2.18). Během zkoušky se zjišťuje, zda vypočtená základní trvanlivost odpovídá testovanému ložisku. Pro stávající zařízení již nejsou dostupné náhradní díly a je nutná jeho rekonstrukce s ohledem na aktuálně dostupné prvky na trhu. Návrh modifikovaného konstrukčního uspořádání stávajícího experimentálního zařízení umožní další možnosti testování trvanlivosti ložisek s výrazně nižšími náklady než by bylo nutné vynaložit na stavbu nového testovacího zařízení.

Vypracováním rešerše byla zjištěna různá konstrukční řešení testování trvanlivosti. V rámci této bakalářské práce budou některá konstrukční řešení využita v rámci rekonstrukce stávajících testovacích zařízení, což povede ke zvýšení účinnosti testování trvanlivosti ložisek a k optimalizaci obsluhy testovacích zařízení.

Při testování trvanlivosti ložisek na zařízeních nynější konfigurace se používají k měření ložisek senzory snímající vibrace zařízení a senzory snímající akustické emise. Dodržením pracovních postupů montáže ložiska a použitím správného způsobu mazání se předejde znehodnocení ložiska před spuštěním testu trvanlivosti.

3.2 Cíle práce

Hlavním cílem bakalářské práce je návrh tří koncepčních řešení pro rekonstrukci nynějšího zařízení pro testování trvanlivosti ložisek s ohledem na snížení nákladů při změně typu testovaného ložiska.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- Náhrada stávající pojistné spojky.
- Návrh možnosti regulace otáček hřídele.
- Návrh způsobu automatického mazání ložisek.
- Návrh vyvozování radiálního zatížení ložisek.
- Vypracování kompletní výkresové dokumentace vybraného konstrukčního řešení.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

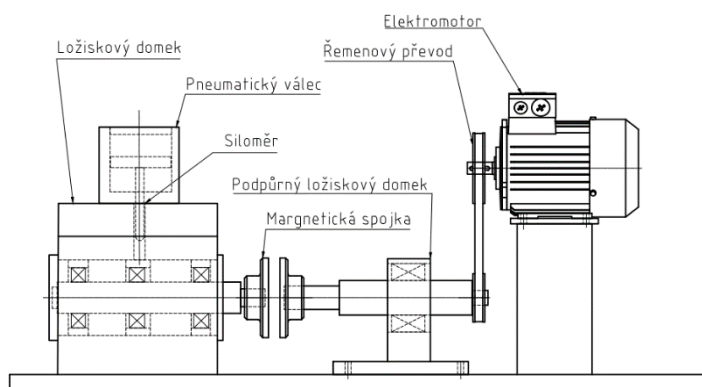
Při rekonstrukčních a konstrukčních pracích je vytvářeno několik koncepčních návrhů konstrukce zařízení. V této kapitole budou vytvořeny tři koncepční návrhy, z kterých následně bude vybrána buďto jedna varianta nebo kombinace vypracovaných koncepčních návrhů. Nakonec bude vybrán vhodný koncepční návrh a následně pak podrobně popsán v následující kapitole.

Při tvorbě koncepčních návrhů rekonstrukce je třeba dbát na současnou konfiguraci testovacího zařízení životnosti ložisek. U koncepčních návrhů zmiňované v této kapitole budou zachovány následující stávající parametry testovacího zařízení.

- Vibrační, teplotní, snímače
- Elektromotor
- Ložiskový domek

4.1 První koncepční návrh

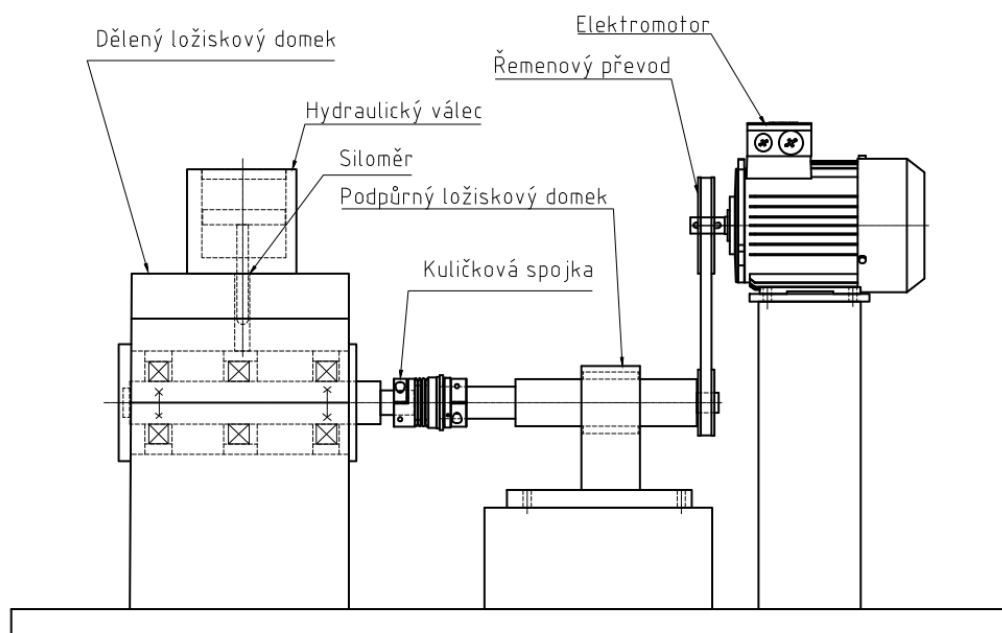
V tomto případě je testovací zařízení ložisek spojeno s měničem frekvence připojeným k elektromotoru. Dále je k motoru připojeno převodové soustrojí založené na řemenovém převodu. Mezi převodovým soustrojím a ložiskovým domkem je vložena magnetická spojka, kdy při překročení určité meze kroutícího momentu dochází k rozpojení. Nastavení vypínacího momentu se provádí velikostí vzduchové mezery mezi polovinami spojky. Mazání ložiska bude prováděno pomocí elektrických snímačů a ventilů připojených do samostatného mazacího systému. Radiální zatížení bude vyvozováno pomocí pneumatického válce. Ložiskový domek zůstane neporušen, bude změněn způsob těsnění vík ložiskového domku pomocí O-kroužku. Jako podporu řemenové hřídele je zvolen stávající ložiskový domek s valivými ložisky.



Obr. 4-1 Schéma první varianty

4.2 Druhý koncepční návrh

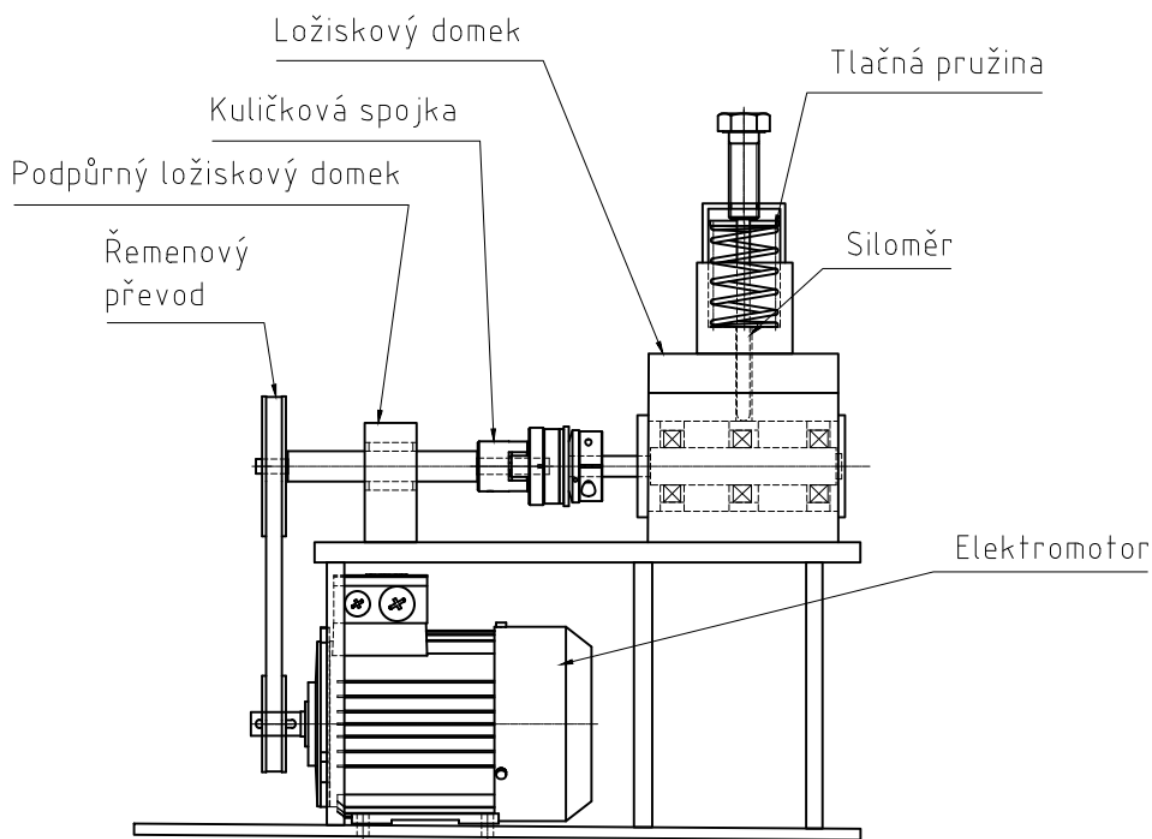
Stejně jako u prvního návrhu je k motoru připojen měnič frekvence a převodové soustrojí tvoří řemen. Mezi převodovým soustrojím a ložiskovým domkem je použito pojistné kuličkové spojky s vlnovcem. Zatížení bude vyvozováno hydraulickým válcem. Mazání ložiska bude prováděno stejně jako u první varianty, tedy elektrickými snímači a ventily. Ložiskový domek bude horizontálně rozdělen pro snadnější vkládání ložisek. Těsnění ložiskového domku bude provedeno pomocí materiálu SV 80. Hřídel mezi řemenem a spojkou je uložena v podpůrném ložiskovém domku s kluzným ložiskem.



Obr. 4-2 Schéma druhé varianty

4.3 Třetí koncepční návrh

Elektromotor bude umístěn pod ložiskovým domkem a krouticí moment bude přenášen řemenovým převodem. Mezi převodovým členem a ložiskovým domkem bude použito pojistné kuličkové spojky. Zatížení bude vyvozováno stlačením pružiny. Mazání ložiska bude prováděno stejně jako u prvního návrhu (elektrickými snímači a ventily). Jako podpora řemenové hřídele je zvolen stávající ložiskový domek s valivými ložisky. Pro měření skutečné zatěžovací síly bude použit siloměr viz Obr. 4-3.



Obr. 4-3 Schéma třetí varianty

4.4 Shrnutí koncepčních řešení

Tab. 4-1 Nevýhody koncepčních řešení

První varianta	Druhá varianta	Třetí varianta
Napínání řemenu	Napínání řemenu	Napínání řemenu
Cena magnetické spojky	Nutnost výroby drážek pro těsnění O-kroužků	Manuální vyvození zatížení
Větší záběr plochy v laboratoři	Větší záběr plochy v laboratoři	-

Tab. 4-2 Výhody koncepčních řešení

První varianta	Druhá varianta	Třetí varianta
Regulace otáček měničem frekvence	Regulace otáček měničem frekvence	Regulace otáček měničem frekvence
Tichý chod řemenového převodu	Tichý chod řemenového převodu	Tichý chod řemenového převodu
Nastavení vypínacího momentu velikostí vzduchové mezery mezi magnety	Jednoduché nastavení kroutícího momentu	Stálost zatížení pomocí pružiny
Automatické doplňování maziva	Automatické doplňování maziva	Automatické doplňování maziva
Přenos kroutícího momentu i při malém zatížení	Přenos kroutícího momentu i při malém zatížení	Přenos kroutícího momentu i při malém zatížení
Větší odolnost a trvanlivost těsnícího materiálu SV 80 než těsnícího papíru	Snadnější manipulace při vkládání ložisek díky dělenému ložiskovému domku	Úspora místa v laboratoři

4.5 Výběr optimálního řešení

Kritérium pro výběr optimální varianty koncepčních řešení pro rekonstrukci je cenová nákladnost rekonstrukce a co největší přínos pro obsluhování testovacího zařízení. Po zvážení těchto kritérií byla vybrána kombinace druhé a třetí varianty koncepčních návrhů. Optimální varianta bude mít uspořádání stejné jako u třetí varianty (Obr. 4-3), tedy dvoupatrové uspořádání. Z druhé varianty bude převzat dělený ložiskový domek a pro vyvozování zatížení bude použit hydraulický píst.

Pro tuto variantu bude vytvořena výkresová dokumentace rekonstruovaných a nových součástí a jednotlivé části této varianty budou popsány v následující kapitole.

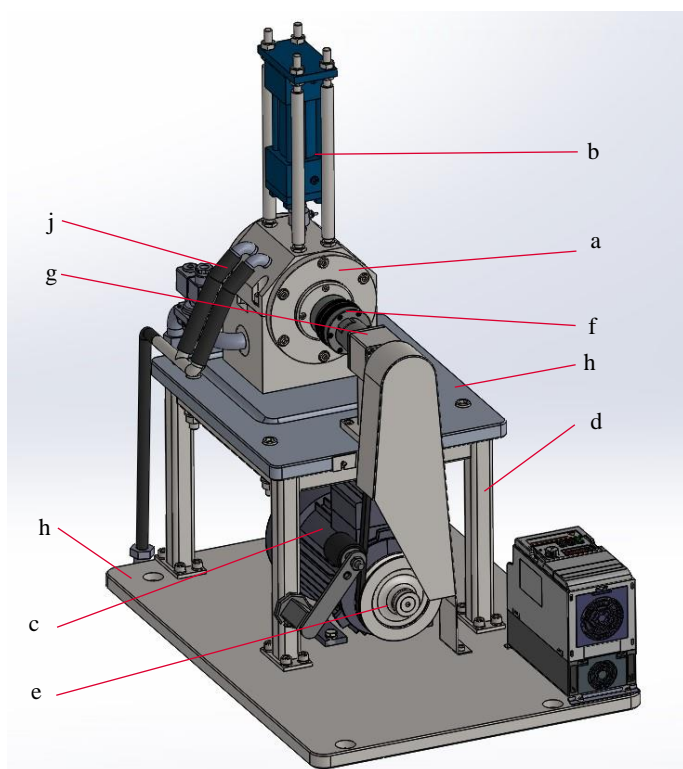
5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V této kapitole bude popsáno navrhnuté koncepční řešení pro rekonstrukci testovacího zařízení ložisek.

5.1 Popis konstrukce testovacího zařízení ložisek

Konstrukce testovacího zařízení ložisek se skládá z několika podsestav a součástí, které budou popsány v následujících podkapitolách.

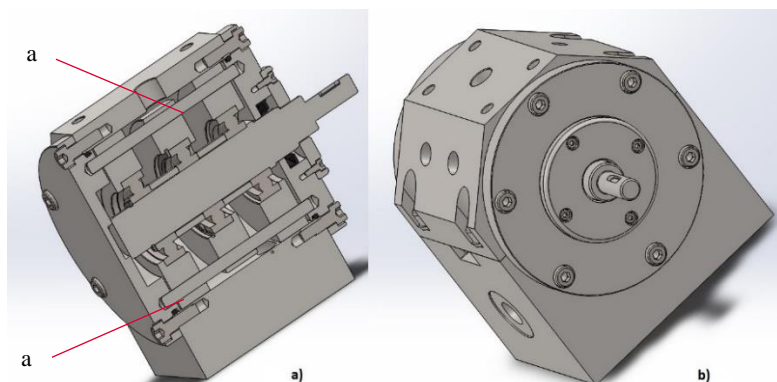
- a) Ložiskový domek
- b) Zatěžovací soustava
- c) Motor
- d) Stůl
- e) Řemenový převod
- f) Spojka
- g) Podpůrný ložiskový domek
- h) Upínací desky
- i) Diagnostika poškození ložisek
- j) Chladicí okruh



Obr. 5-1 Testovací zařízení

5.2 Ložiskový domek

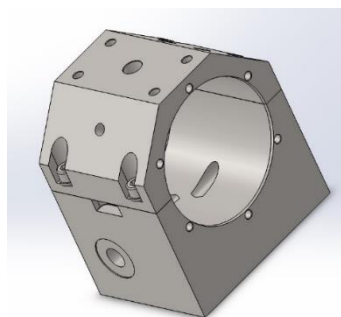
Nejdůležitější součástí testovacího zařízení je podsestava ložiskového domku, v kterém se ukládají testovaná ložiska. (Obr. 5-2). Pro větší velikost otáček je ložiskový domek vybaven dvěma čepy (a), které zajišťují ložisková pouzdra proti protočení, a zamezují tak nebezpečí zničení snímače vibrací.



Obr. 5-8 Ložiskový domek: a) řez, b) 3d model

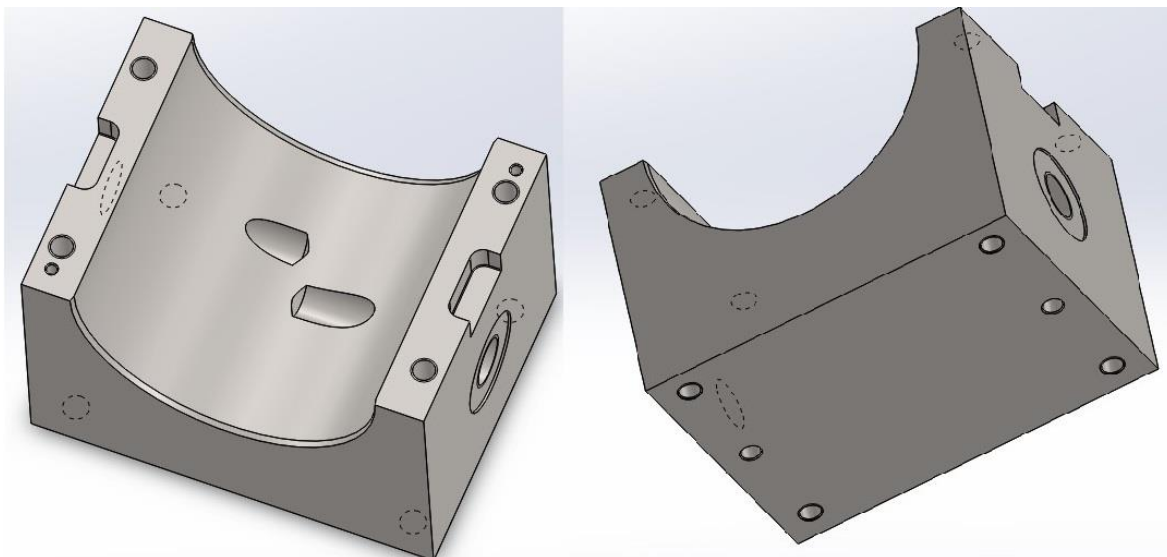
5.2.1 Těleso ložiskového domku

Těleso ložiskového domku (Obr. 5-3) se kvůli snazší manipulaci při obsluze testovacího zařízení skládá ze dvou částí (Obr 5-4, Obr. 5-5). Materiál obou částí tělesa byl zvolen 16MnCr5 kvůli vhodným vlastnostem pro tepelné zpracování. Průchozí díra o průměru 120 mm je tepelně zpracována na tvrdost 60HRC a následně broušena. Rozměr průchozí díry zůstal zachován ze starého ložiskového domku, aby mohly být dále používány stávající přípravky na testování jiných druhů ložisek. Pro možnost použití starých vík a snadnější zavádění vík opatřených O-kroužkem je průchozí díra opatřena také sražením. Dělicí rovina je broušena do hladka. Pro utěsnění dělicí roviny bude použito těsnícího papíru tloušťky 0,25 mm. Na čelech tělesa jsou vyvrtány závitové díry M8 pro připojení vík. Pro dodržení správné pozice jsou díry vyvrtány až po složení obou částí.



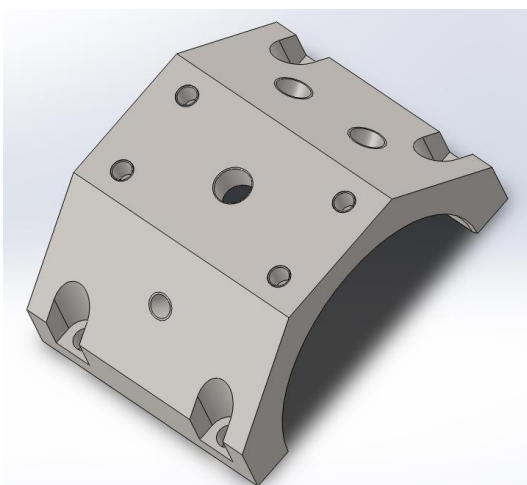
Obr. 5-15 Ložiskové těleso

Spodní část tělesa má v dělicí rovině vyvrtány čtyři závitové díry M10 a dvě díry pro stavěcí kolíky o průměru 4 mm, kvůli zajištění správné pozice průchozí díry. Spodní část je také vybavena drážkou pro uchopení stahováku při výměně ložisek. Pro uchycení je opatřena spodní část čtyřmi závitovými dírami M10 a dále jsou vyvrtány dvě díry o průměru 8 mm pro stavěcí kolíky. Na stranách spodní části jsou vyvrtány díry pro odvod a měření hladiny oleje s trubkovým závitem G1/2".



Obr. 5-22 Spodní část tělesa

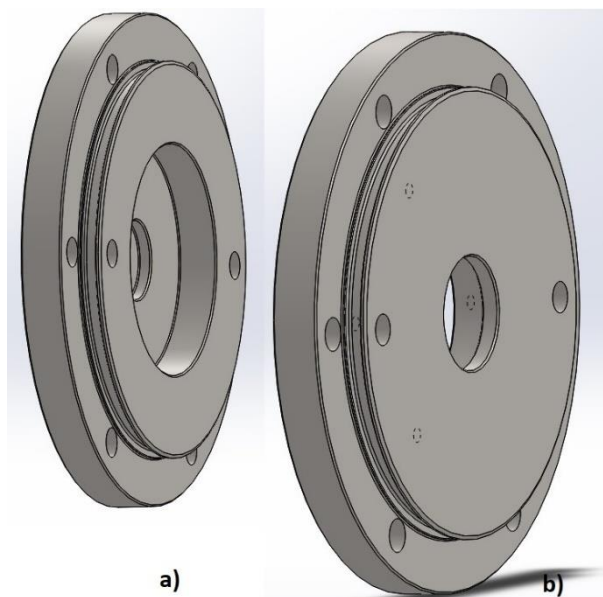
Na vrchní části tělesa jsou vyvrtány průchozí díry pro šrouby M10 se zahlučením pro hlavu šroubu. Na ploše dělicí roviny jsou vyvrtány dvě díry pro stavěcí kolík o průměru 4 mm. Na šikmé straně je vyvrtána jedna závitová díra M12 pro ustavení snímače vibrací. Dále jsou na druhé straně vyvrtány závitové díry G3/8" pro přívod oleje. Na vrchní ploše jsou vyvrtány čtyři závitové díry M10 sloužící pro uchycení svorníku hydraulického pístu. Dále je zde vyvrtána díra o průměru 16 mm pro přenos zatížení na ložisko.



Obr. 5-23 Vrchní část tělesa

5.2.2 Víka

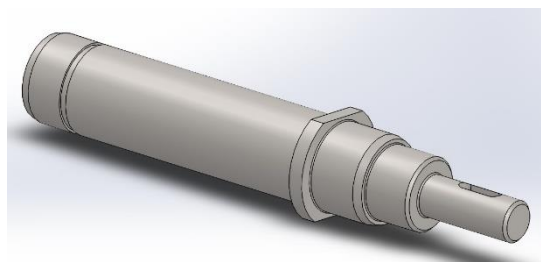
U těchto součástí dojde pouze k úpravě stávajících vík, kde se bude obrábět pouze drážka pro těsnící O-kroužek na průměru 120 mm a vrtat jedna díra pro zajišťovací čep na čele víka.



Obr. 5-30 Víka: a) víko1; b) víko2

5.2.3 Hřídel

Hřídel je vyhotovena z materiálu 42CrMo4, který se hodí k tepelnému zpracování. Délka hřídele je 188 mm a průměr pro testované ložisko je 30 mm. Hřídel je na jedné straně opatřena zápichem pro pojistný kroužek a na druhé straně je vybavena odsazením, na kterém jsou kvůli manipulaci při demontáži ložiska vyfrézované dvě rovnoběžné plochy. Na hřídeli je vyfrézována drážka pro pero tloušťky 5 mm. Toto pero bude pak po vložení do spojky přenášet kroutící moment. Kvůli velkému namáhání musí být hřídel tepelně zpracována na tvrdost 1076 HV, a musí být u ní dodržena velká geometrická a rozměrová přesnost.



Obr. 5-31 Hřídel

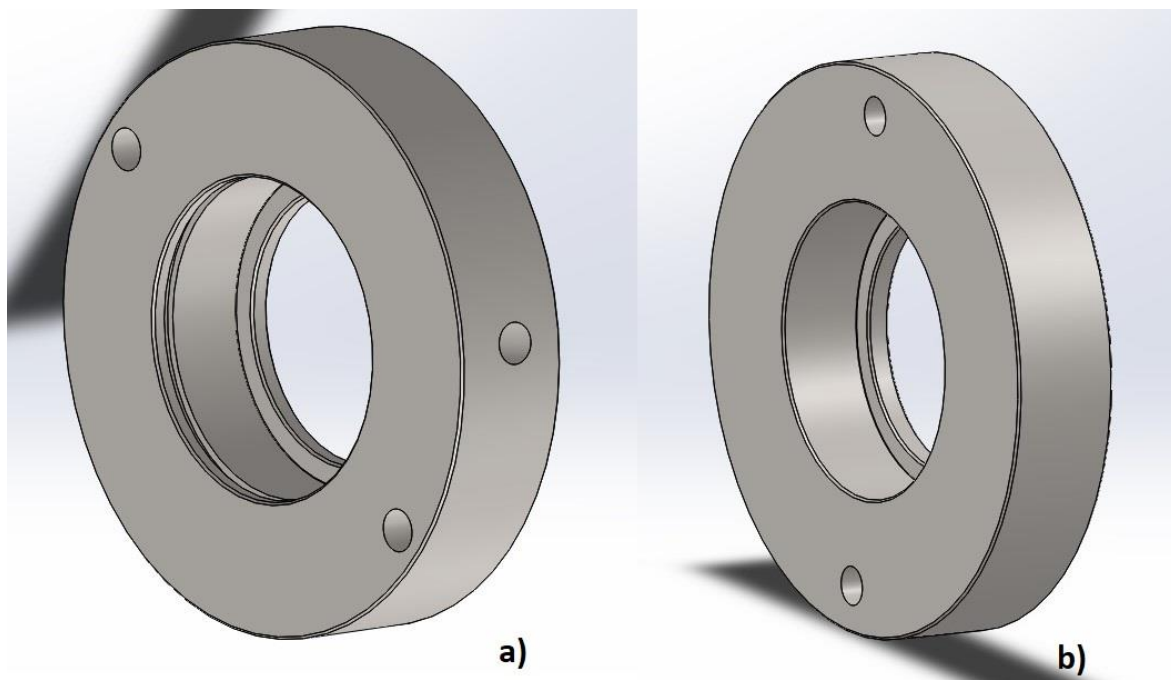
5.2.4 Ložisková pouzdra

Jako materiálu ložiskových pouzder je zde použito oceli 16MnCr5, aby bylo možno pouzdra tepelně zpracovat na tvrdost 60HRC. Budou zde využity dva druhy pouzder:

- Testovací (Obr. 5-8a)
- Podpůrná (Obr. 5-8b)

Testovací pouzdro má vnější průměr 114 mm a vnitřní průměr je upraven na ložisko typu 6206. Pouzdro je vybaveno drážkou pro pojistný kroužek a průchozími otvory průměr 8,2 mm pro zajišťovací čep. Na testovací ložisku je vyvrtán otvor o průměru 8 mm, pro umístění snímače vibrací.

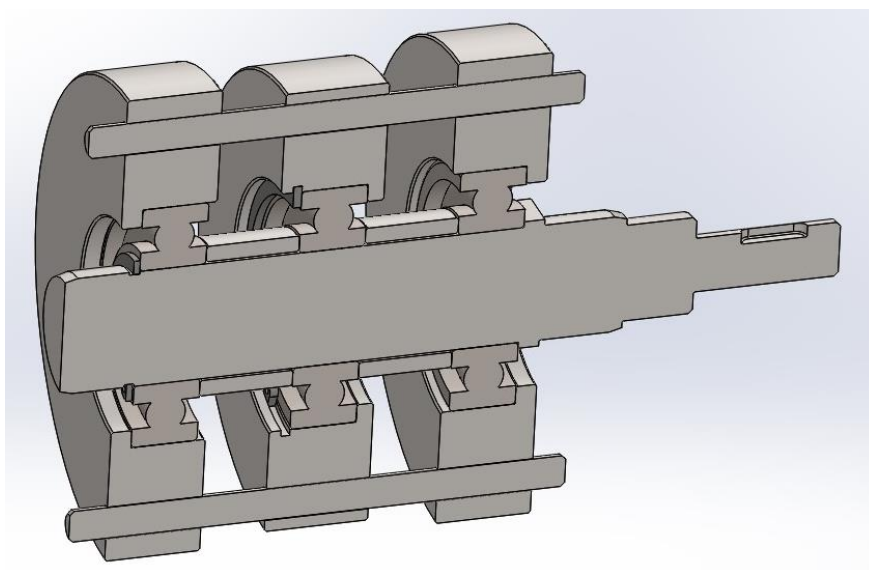
Podpůrné ložisko má vnější průměr 120 mm a vnitřní průměr je upraven na ložisko typu 6206. Oproti testovacímu ložisku nejsou podpůrná pouzdra vybavena otvorem pro snímač vibrací.



Obr. 5-38 Pouzdra a) testovací; b) podpůrná

5.3 Uložení ložisek

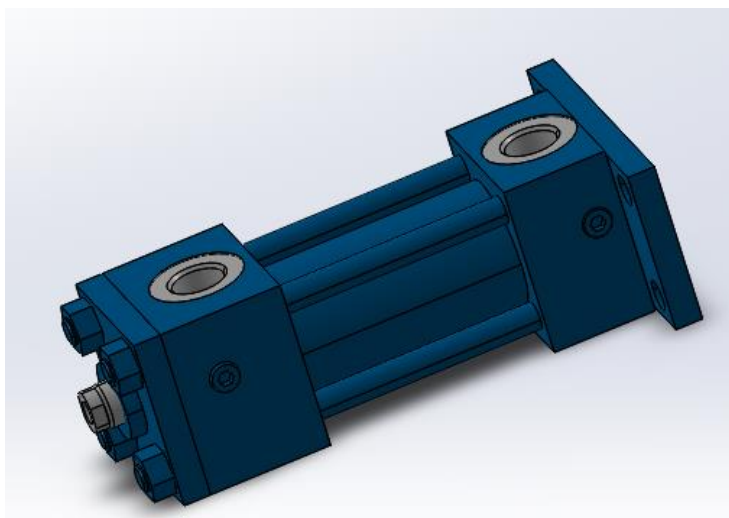
Jako testovací ložiska jsou použita kuličková ložiska typu 6206. Pro zajištění správné pozice na hřídeli jsou mezi ložiska vloženy dvě distanční vložky z materiálu C45 a poté zajištěny pojistným kroužkem na hřídeli. Tím je zaručena axiální pozice ložisek.



Obr. 5-39 Uložení

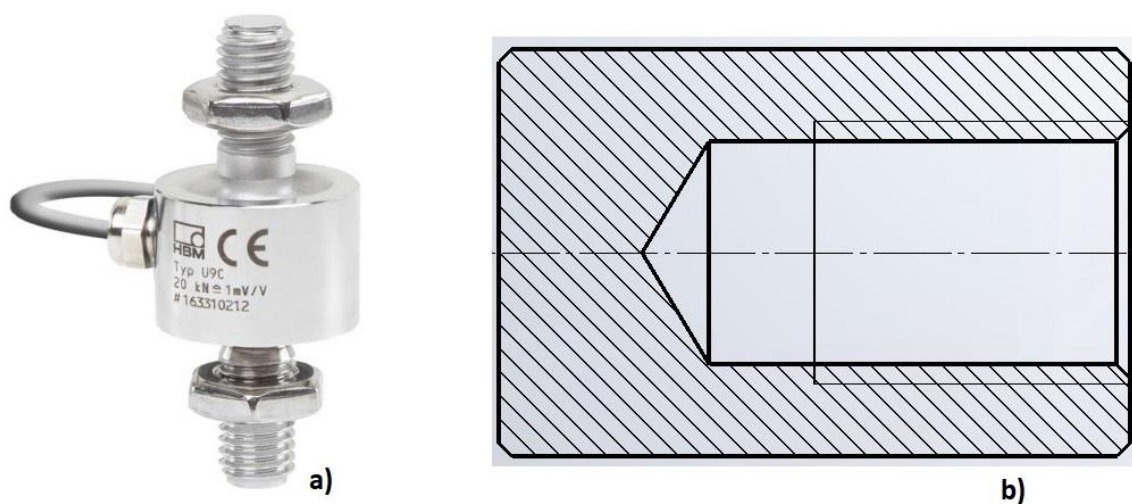
5.4 Zatěžovací soustava

Jako zatěžovací člen byl zvolen hydraulický válec firmy Rexroth (Obr. 5-10), který pracuje s tlakem 150 *bar* a zatěžovací síla je 15 *kN*. Měření zatěžovací síly je prováděno siloměrem U9C (Obr. 5-11a) který přenáší tuto informaci do počítače. Dále je zatížení převedeno pomocí zatěžovacího čepu na testované ložisko. Pro umístění válce na ložiskový domek bylo použito čtyř svorníků délky 280 *mm* se závitem M10 na obou koncích svorníku.



Obr. 5- 40 Hydraulický válec

Zatěžovací čep (Obr. 5-11b) je zhotoven z materiálu 16MnCr5 a tepelně zpracován na tvrdost 60HRC.



Obr. 5-41 a) Siloměr (24); b) zatěžovací čep

5.5 Motor

Jako motor je použit stávající trojfázový elektromotor používaný na původních testovacích stanicích. Parametry motoru jsou v Tab 5-1

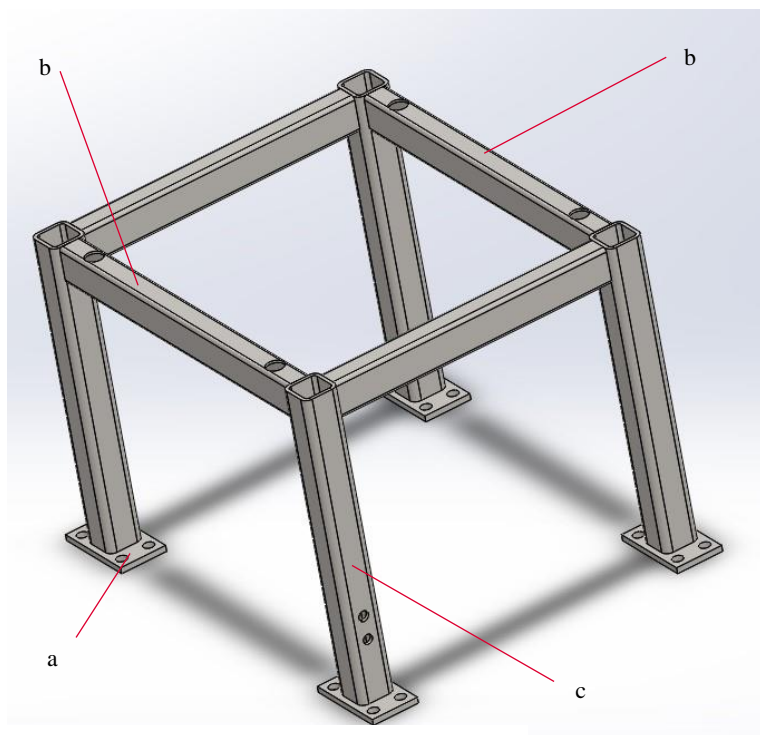
Tab.5-1 Parametry elektromotoru

Parametr	hodnota
Výkon	1.1 kW
Výstupní otáčky	2845 min ⁻¹
Krouticí moment	3,7 Nm

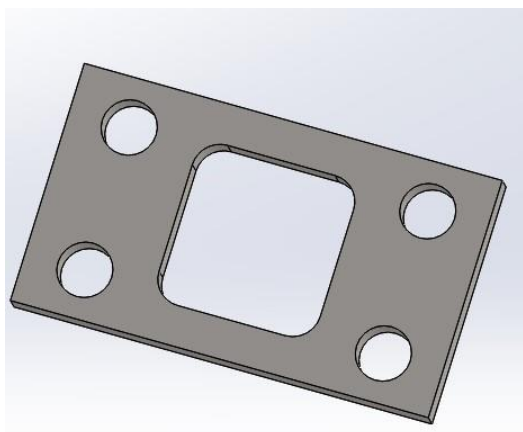
Pro zvýšení počtu otáček je použit převod klínovým řemenem a pro regulaci otáček je k motoru připojen frekvenční měnič firmy Roxroth EFC 3610.

5.6 Stůl

Další podsestavou testovacího zařízení je stůl, jenž je svařenec z uzavřených profilu 30x30x3 a 30x20x3 a patek noh s otvory o průměru 9 mm. V profilech 30x20x3 (b) jsou vyvrtány otvory o průměru 13,5 mm pro přimontování vrchní desky. U nohy (c) je vyvrtán otvor o průměru 8,5 mm a závitový otvor M8 pro upevnění napínáku řemene. U jedné patky (a) je vytvořen otvor pro odvod oleje, který stéká otvorem v horní desce ze žlabů do olejové lázně umístěné pod testovacím zařízením.



Obr. 5-43 Stůl



Obr. 5-42 Patka s otvorem

5.7 Řemenový převod

Pro urychlení testu trvanlivosti je nutno zvýšit otáčky na 5000 min^{-1} . Výstupní otáčky motoru jsou 2845 min^{-1} . Bylo potřeba navrhnout parametry řemenového převodu tak, aby bylo dosaženo požadovaných otáček. Při použití frekvenčního měniče bude pak možno měnit otáčky až do 5000 min^{-1} .

Pro stálý převodový poměr je přidán do sestavy napínák řemene TERE 3 od firmy Haberkon.

Jak je výše uvedeno, tak otáčky motoru jsou nižší než maximální testové otáčky. Proto je potřeba provést výpočet řemenového převodu dorychla. Zvolené rozměry a další vstupní parametry jsou v Tab. 5-2.

Tab.5-2 Vstupní výpočtové parametry

Veličina		Hodnota	Jednotka
Výpočtový průměr malé řemenice	d_p	63	mm
Požadované otáčky	n_1	5000	min^{-1}
Otáčky motoru	n_2	2845	min^{-1}
Výkon motoru	P	1,1	kW

- Převodový poměr:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{5000}{2845} = 1,76$$

- Výpočtový průměr velké řemenice:

$$D_p = d_p \cdot i = 63 \cdot 1,76 = 110,7 \text{ mm}$$

Dle Strojírenských tabulek (20) str. 535 volím $D_p = 112 \text{ mm}$

- Skutečný převodový poměr:

$$i_{skut} = \frac{D_p}{d_p} = \frac{112}{63} = 1,78$$

- **Stanovení návrhové osově vzdálenosti:**

$$0,7(D_p + d_p) \leq A_n \leq 2(D_p + d_p)$$

$$0,7(112 + 63) \leq A_n \leq 2(112 + 63)$$

$$122,5 \leq A_n \leq 350$$

Z daného intervalu volím $A_n = 302 \text{ mm}$

- **Úhel opásání malé řemenice:**

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{D_p - d_p}{2 \cdot A_n} = \frac{112 - 63}{2 \cdot 302} \Rightarrow \beta = 170,7^\circ$$

$$\alpha_0 = 90^\circ - \frac{\beta}{2} = 90^\circ - \frac{170,7^\circ}{2} = 4,65^\circ$$

- **Stanovení délky řemene:**

$$L_p = 2 \cdot A_n \cdot \sin \frac{\beta}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot (D_p + d_p) + \frac{\pi \cdot \alpha_0}{180^\circ} \cdot (D_p - d_p)$$

$$L_p = 2 \cdot 302 \cdot \sin \frac{170,7}{2} + \frac{\pi}{2} \cdot (112 + 63) + \frac{\pi \cdot 4,65}{180^\circ} \cdot (112 - 63)$$

$$L_p = 880,9 \text{ mm}$$

Dle ST (20) str 532 volím výpočtovou délku řemenice $L_p = 900 \text{ mm}$

- **Skutečná osová vzdálenost:**

$$p = 0,25 \cdot L_p - 0,393 \cdot (D_p + d_p)$$

$$p = 0,25 \cdot 900 - 0,393 \cdot (112 + 63) = 156,225$$

$$q = 0,125 \cdot (D_p - d_p)^2$$

$$q = 0,125 \cdot (112 + 63)^2 = 300,125$$

$$A = p + \sqrt{p^2 - q} = 156,225 + \sqrt{156,225^2 - 300,125} = 311,5 \text{ mm}$$

- **Počet klínových řemenů:**

Pro výpočet počtu řemenů je potřeba ze ST (20) str. 545-550 zvolit několik součinitelů podle výše vypočtených parametrů.

Součinitel úhlu opásání $c_1 = 0,95$

Součinitel provozního zatížení $c_2 = 1,3$

Součinitel délky klínového řemene $c_3 = 0,88$

Výkon přenášený jedním úzkým řemenem $P_r = 2,75 \text{ kW}$

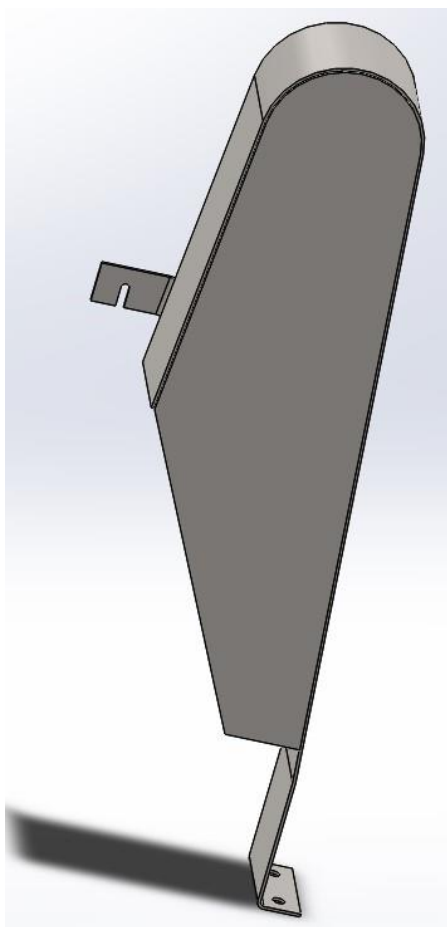
$$z = \frac{P \cdot c_2}{P_r \cdot c_1 \cdot c_3} = \frac{1,1 \cdot 1,3}{2,75 \cdot 0,95 \cdot 0,88} = 0,62$$

Nejbližší počet řemenu je jedna. Volím tedy převod jedním klínovým řemenem SPZ.

- **Závěr výpočtu řemenového převodu:**

Z výpočtu vyplývá, že zařízení bude poháněno jedním klínovým řemenem SPZ s výpočtovou délkou $L_p = 900 \text{ mm}$. Převod umožňuje zvýšit otáčky motoru 2845 min^{-1} na požadovaných 5000 min^{-1} . Skutečná osová vzdálenost je nakonec $311,5 \text{ mm}$.

Součástí řemenového převodu je také kryt, který je svařen ze dvou plechových součástí o tloušťce $1,5 \text{ mm}$ ze svařitelného materiálu S235JR. Ohýbaná část chrání řemen po obvodu a na tuto součást je navařen rovný plech. Kryt bude upevněn na desku dvěma šrouby M5 a jedním šroubem M3 podpírán z čela desky stolu.



Obr. 5-47 Kryt řemene

5.8 Spojka

Převod kroutícího momentu od řemenového převodu k ložiskovému domku je zajištěn bezpečnostní kuličkovou spojkou EPK-19 (Obr. 5-15) německé firmy KBK. Pro případnou nehodu testovacího zařízení je možno na spojce nastavit vypínací (bezpečnostní) moment.

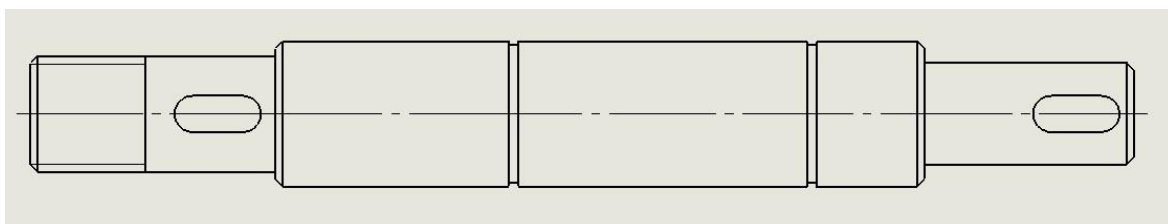


Obr. 5-48 Spojka KBK/EPK-19 (25)

5.9 Podpůrný ložiskový domek

Jako podpora mezi spojkou a malou řemenicí bude sloužit stávající ložiskový domek ze starého zařízení. Bude zde akorát potřeba vyrobít novou hřídel.

Hřídel podpůrného ložiskového domku (Obr. 5-16) je vyrobena z materiálu 16MnCr5 a následně tepelně zpracována na tvrdost 50HRC. Hřídel má délku 153 *mm* a na průměru 20 *mm* jsou zápichy pro pojistné kroužky na pevné umístění ložisek ložiskové jednotky. Oba konce hřídele jsou opatřeny drážkami pro pero šířky 5 *mm* pro přenos kroutícího momentu. Jeden konec hřídele je zakončen závitem M16 pro zajištění axiální pozice hřídele a malé řemenice.

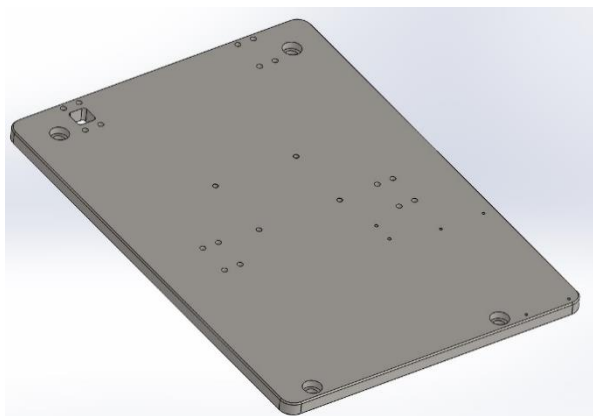


Obr. 5-49 Hřídel podpůrného ložiskového domku

5.10 Upínací desky

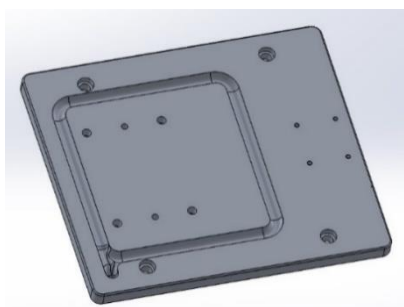
Jsou použity dvě upínací desky – horní a vrchní. Upínací desky slouží pro ustavení součástí testovacího zařízení.

Spodní upínací deska (Obr. 5-17) slouží pro ustavení motoru šrouby čtyřmi šrouby M8 a uchycení frekvenčního měniče pomocí čtyř šroubů M4. Dále jsou na desce závitové otvory pro šestnáct šroubů M8 na upevnění stolu. Čtyři díry o průměru 17,2 mm slouží pro připojení na stávající konstrukci testovacích zařízení. Dále jsou zde vyvrtány dvě závitové díry pro šrouby M5 na umístění krytu řemene. V jednom z rohů je díra, která slouží pro odvod oleje zpátky do olejové lázně. Je tak řešen jak problém možných průsaků ložiskového domku, tak také odvod oleje při demontáži zkoušených ložisek na konci testu. Spodní deska je vyrobena z materiálu C45.



Obr. 5-50 Spodní upínací deska

Vrchní upínací deska (Obr. 5-18) je vyrobena ze slitiny hliníku EN AW 2024 z důvodu odlehčení sestavy testovacího zařízení. Tento materiál také vykazuje mezi hliníkovými slitinami velkou hodnotu meze pevnosti $R_m = 460 \text{ MPa}$. V desce jsou vyvrtány čtyři zahluobené díry o průměru 11 mm pro uchycení ložiskového domku. Dále jsou zde vyvrtány dvě díry průměru 8 mm pro stavěcí kolíky ložiskového domku. Po obvodě ložiskového domku jsou vyfrézovány drážky pro odvod oleje pocházejícího z možných průsaků nebo demontáže ložiskového domku. Je zde také vyvrtána průchozí díra, skrz kterou přebytečný olej stéká zpátky do olejové lázně. Pro ustavení podpůrného ložiskového domku jsou zde vyvrtány čtyři závitové díry M6. Z čela upínací desky je vyvrtána závitová díra M3 pro ustavení krytu řemene. Po obvodě jsou vyvrtány zahluobené díry o průměru 13,5 mm na upevnění upínací desky na svařovaný díl stolu.



Obr. 5-55 Vrchní upínací deska

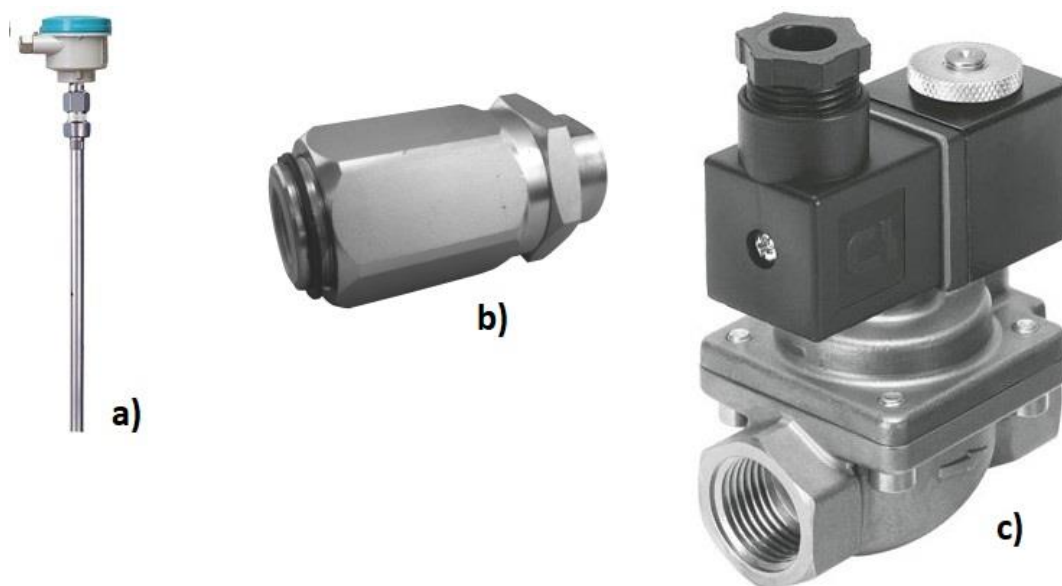
5.11 Diagnostika poškození ložisek

Pro diagnostiku ložisek bude použito stávajícího diagnostického systému na stávajícím zařízení, tedy snímačů vibrací se zabudovaným termočlánkem. Tyto snímače jsou zapojeny na analyzátor VC-1500 od firmy ViDiTech s.r.o., který pak převádí naměřené hodnoty přes USB CAN převodník do počítače.

5.12 Chladicí okruh

Chladicí okruh testovacího zařízení je vybaven olejovým filtrem a škrťacím ventilem VRB (Obr. 5-19b) firmy REROSA-HYDRAULIKA s.r.o. pro zvýšení tlaku v přívodu oleje do ložiskového domku. Na ložiskovém domku jsou dva otvory se závitem G3/8'', na kterých jsou přimontovány hydraulické úhlové odbočky s hadicovými koncovkami.

Pro odvod oleje je ve středu tělesa připojeno rohové šroubení, na němž je připojený elektrický ventil VZWP (Obr. 5-19c) od firmy FESTO s.r.o. napojený na kontrolní ovládací panel. Pro automatické hlídání hladiny je z druhé strany připojen přes rohové šroubení a průhlednou plastovou trubku snímač hladiny SITRANS LC300 (Obr. 5-19a) od firmy Siemens. Tento senzor detekuje výšku hladiny oleje a posílá informaci do kontrolního panelu. Po nastavení mezí hladin je pak otevírán či zavírán ventil VZWP.



Obr. 5-62 a) Snímač SITRANS LC300 (28); b) škrťací ventil VRB (27); c) Ventil VZWP (26)

Pro chlazení je použit převodový olej Titan ATF 3353 od výrobce Fuchs.

6 DISKUZE

Při vypracování koncepčních návrhů byly zohledněny poznatky získané v rešersní části této práce, a to z různých testovacích zařízení používané ve vědeckých laboratořích a výrobních laboratořích firem zabývajících se výrobou valivých ložisek. Také byly zohledněny námitky vedoucího práce. Jako konstrukční řešení byla zvolena kombinace druhé a třetí varianty.

Při vytváření konstrukce testovacího zařízení byly zohledněny rozměry stávajícího testovacího zařízení a byla zachována většina připojovacích rozměrů. Mohou tak být nadále používány přípravky zkonstruované pro stávající zařízení. Při použití nových přípravků bude potřeba výroba druhé díry pro zajišťovací čep v ložiskových pouzdrech a při použití vík bude třeba obrobit drážku pro těsnící O-kroužek a díru pro druhý zajišťovací čep. U stávajícího zařízení jsou testovací otáčky rovny výstupním otáčkám motorů (2845 min^{-1}). Z důvodů možnosti zvýšení počtu testovacích otáček až na 5000 min^{-1} bylo pro zvýšení bezpečnosti proti protočení ložiskových pouzder nutno navýšit počet zajišťovacích čepů.

Při konstrukci děleného ložiskového domku bylo papírové těsnění stávajícího zařízení nahrazeno O-kroužkem pro lepší těsnící vlastnosti a nevznikání axiálních posuvů při dotáhnutí různým utahovacím momentem víka, kdy těsnící papír má tendenci se smrsknout.

Při výpočtu řemenového převodu musela být upravena výška stolu dle zvolené délky řemenu.

Při výběru hydraulického válce byla brána v potaz velikost zatěžovací síly u stávajícího zařízení, která činí 8 kN . Nový hydraulický válec bude schopen vyvodit sílu až 15 kN .

7 ZÁVĚR

V rešeršní části práce byl vypracován stručný přehled rozdělení ložisek a jejich nejčastějších vad způsobených za provozu stroje. Dále byly popsány nejpoužívanější metody zjišťování vad ložisek. Mezi tyto metody patří měření akustických emisí, měření vibrací, termodiagnostika nebo měření hluku, přičemž nejrozšířenější je měření vibrací.

Dále bylo v rešeršní práci popsáno deset různých zařízení používaných k testování ložisek jak ve vědeckých laboratořích, tak i ve firemních laboratořích různých světových společností zabývajících se výrobou ložisek. Na základě poznatků získaných zkoumáním těchto deseti zařízení byly vypracovány tři koncepční návrhy úpravy testovacího zařízení na FSI VUT.

První koncepční návrh řeší pouze výměnu nové bezpečnosti spojky, řemenového převodu a nový pneumatický válec.

Druhý koncepční návrh obsahuje dělený ložiskový domek pro snazší manipulaci s ložisky, nový hydraulický válec a novou bezpečnostní spojku.

Třetí koncepční návrh zahrnuje navíc stůl pro umístění stroje na dvě patra a nově je zatížení vyvozováno pomocí šroubu. U všech třech koncepčních návrhů byl k motoru připojen frekvenční měnič pro regulaci otáček.

Pro konstrukční řešení byla vybraná kombinace druhé a třetí varianty (stůl, dělený ložiskový domek, hydraulický píst, frekvenční měnič). Pro tuto variantu byla vypracována výkresová dokumentace, která řeší úpravu některých stávajících součástí (víka, ložisková pouzdra, hřídel ložiskového domku) a výrobu nových součástí (ložiskový domek, řemenice, stůl, upínací desky). V konstrukční části jsou jednotlivé součásti detailně popsány.

V diskuzi byly následně popsány problémy při použití přípravků určených pro stávající testovací zařízení a jejich případné řešení.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- (1) SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE a Richard BUDYNAS, Miloš VLK, Martin HARTL. *Konstruování strojních součástí*. První. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- (2) *PRO KONSTUKTÉRY: 7. Ložiska - všeobecné údaje* [online]. ZKL, b.r. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/7-loziska-vseobecne-udaje>
- (3) *PRO KONSTUKTÉRY: 5. Určení velikosti ložiska* [online]. ZKL, b.r. [cit. 2019-01-16]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/5-urceni-velikosti-loziska#54>
- (4) ČSN ISO 281: *Valivá ložiska - Dynamická únosnost a trvanlivost*. Prosinec 2018. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2018.
- (5) *PRO KONSTUKTÉRY: 11. Vady s poškození ložisek* [online]. ZKL, b.r. [cit. 2019-01-18]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/11-vady-s-poskozeni-lozisek>
- (6) POLÁČEK, V. *Studium trvanlivosti valivých ložisek 6204 - 2Z*. Brno, 2014. Bakalářská práce. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Milan Klapka. Ph.D.
- (7) FREJLICH, T. *Konstrukce experimentálního zařízení pro trvanlivostní zkoušky ložisek*. Brno, 2015. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Svoboda, Ph.d.
- (8) ZKL VÝZKUM A VÝVOJ, A.S. *Montážní Příručka* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-01-24]. Dostupné z: http://www.zkl.cz/sites/default/files/Montazni_prirucka_2014_CZE_1.pdf
- (9) VACULKA, M. *Návrh metodiky výpočtu životnosti valivého ložiska*. Brno, 2016. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce RNDr. Ing. Jan Vrbka, DrSc., dr. h. c.
- (10) *Timken Improves Bearing Testing Process* [online]. b.r. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/company/user_stories/timken-improves-bearing-testing-process.html

- (11) RICHARDSON, Andrew, Michael EVANS a Ledi WANG. The Evolution of White Etching Cracks (WECs) in Rolling Contact Fatigue-Tested 100 Cr 6 steel. *Tribology Letters*. 2017, **2018**, 23. ISSN 1573-2711. Dostupné také z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11249-017-0946-1>
- (12) NECTOUX, Patrick, Rafael GOURIVEAU, Kamal MEDJAHHER, Emmanuel RAMASSO, Brigitte CHEBEL-MORELLO, Noureddine ZERHOUNI a Christophe VARNIER. *PRONOSTIA : An experimental platform for bearings accelerated degradation tests*. [online]. Denver, 2012 [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00719503>
- (13) XIAOYANG, Chen, Liu LEI a Zhang JIAN. *Rolling contact fatigue life testing machine for bearing roller*. 2011. Čína. CN 201120060989. Uděleno 10.3.2011. Zapsáno 23.11.2011.
- (14) PETERY, Georg a Reinhard RUMPEL. *Innovative Bearing Concepts for the Powertrains of the Future* [online]. b.r. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <http://schaeffler-events.com/symposium/lecture/t5/index.html#literature>
- (15) SUNG, Baek. Deduction of Reliability Parameter for Spherical Roller Bearing. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications* [online]. 2016, **3**(4), 6 [cit. 2019-01-26]. DOI: 10.11648/j.ijmea.20160403.15. ISSN 2330-0248. Dostupné z: <http://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.ijmea.20160403.15.html#paper-content-4>
- (16) HORÁČKOVÁ, Vlasta. *ZKL Výzkum a vývoj a.s.* 2017. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/8678255-Zkl-vyzkum-a-vyvoj-a-s.html>
- (17) GUO, Wei, Hongrui CAO, Zhengjia HE a Laihao YANG. Fatigue Life Analysis of Rolling Bearings Based on Quasistatic Modeling. *Shock and Vibration* [online]. 2015, **2015**, 1-10 [cit. 2019-03-04]. DOI: 10.1155/2015/982350. ISSN 1070-9622. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/sv/2015/982350/>
- (18) RATHUSKÝ, Jiří. ZKL VÚVL, A.S.,. *Zkušební zařízení pro ložiska, zejména válečková a jehlová*. b.r. Československo. 215922. Uděleno 4.6.1982.
- (19) RATHUSKÝ, Jiří *Zkušební zařízení pro ložiska*. b.r. 215923. Uděleno 1.10.1984.
- (20) LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008. ISBN 978-80-7361-051-7.

- (21) KOTLÁN, Karel. *Vady ložisek* [online]. SCZL, b.r., , 138 [cit. 2019-01-17]. Dostupné z: <https://www.sczl.cz/download/download/2011-boretice/13-zkl-kotlan-vady-lozisek.pdf>
- (22) GONZALEZ, Carlos. What is the difference between bearings?. In: *Machine Design* [online]. b.r. [cit. 2019-01-11]. Dostupné z: <https://www.machinedesign.com/whats-difference-between/what-s-difference-between-bearings-1>
- (23) TIMKEN. *Bearing ratings and life Equations*. Timken training, b.r. Dostupné také z: <https://www.scribd.com/document/388716340/3-Apres-Lab-Motores-Pav-Mec-III-Bearing-Ratings-and-Life-Equations>
- (24) U9C, HBM měřicí technika. In: *HBM měřicí technika* [online]. HBM, b.r. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/produkty/snimace-sily/u9c/>
- (25) *Torque Limiters / Safety Couplings* [online]. In: . KBK Coupling Systems, b.r. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.kbk-antriebstechnik.de/en/products/torque-limiters-safety-couplings/with-servo-inserts-spiders/>
- (26) Elektromagnetické ventily VZWP. In: *FESTO* [online]. FESTO s.r.o., b.r. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/search?query=VZWP-L-M22C-G12-130-1P4-40
- (27) Škrticí ventil VRB [online]. In: . JSC-Pelhřimov, b.r. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.jsc-hydraulika.cz/cz/products/detail/233/Skrtici-ventil-VRB---dvoucestny>
- (28) SITRANS LC300 [online]. In: . Siemens, b.r. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/en/process-instrumentation/level-measurement-with-level-measuring-instruments/continuous/capacitance/pages/sitrans-lc300.aspx>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

L_{10}	(min^{-1})	základní výpočtová trvanlivost
F	(N)	zatížení
L	$(-)$	základní trvanlivost
C_r	(N)	základní radiální dynamická únosnost
C_a	(N)	základní axiální dynamická únosnost
C	(N)	základní dynamická únosnost
a	$(-)$	koeficient druhu ložiska
L_R	(h)	základní výpočtová trvanlivost
n_R	(min^{-1})	jmenovitá frekvence otáčení
F_D	(N)	požadované radiální zatížení
L_D	(h)	požadovaná základní trvanlivost
n_D	(min^{-1})	požadovaná frekvence otáčení
P	(N)	ekvivalentní dynamické zatížení
X	$(-)$	koeficient radiálního dynamického zatížení
Y	$(-)$	koeficient axiálního dynamického zatížení
F_r	(N)	radiální zatížení ložiska
F_a	(N)	axiální zatížení ložiska
L_{nm}	(10^6 ot.)	Modifikované trvanlivost
a_1	$(-)$	koeficient spolehlivosti pro jinou než 90% spolehlivost
a_{ISO}	$(-)$	koeficient materiálu, maziva, technologie výroby a provozních podmínek
d_P	(mm)	výpočtový průměr malé řemenice
D_P	(mm)	výpočtový průměr velké řemenice
i	$(-)$	převodový poměr
i_{skut}	$(-)$	skutečný převodový poměr
n_1	(min^{-1})	požadované otáčky
n_2	(min^{-1})	otáčky motoru

P	(kW)	výkon motoru
A_n	(mm)	návrhová osová vzdálenost
β	$(^\circ)$	úhel opásání malé řemenice
L_p	(mm)	výpočtová délka řemenice
A	(mm)	skutečná osová vzdálenost
c_1	$(-)$	Součinitel úhlu opásání
c_2	$(-)$	Součinitel provozního zatížení
c_3	$(-)$	Součinitel délky klínového řemene
P_r	(kW)	Výkon přenášený jedním úzkým řemenem
Z	$(-)$	počet řemenů

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Kuličkové ložisko (22).....	15
Obr. 2-2	Závislost mezi zatížením a trvanlivostí valivého ložiska v logaritmickém měřítku (1).....	16
Obr. 2-3	Dráha vnějšího kroužku – Pitting (21).....	19
Obr. 2-4	Axiální přetížení soudečkového ložiska (21)	19
Obr. 2-5	Hnědé plochy způsobené nedostatečnou vrstvou mazacího filmu (21).....	20
Obr. 2-6	Koroze (21)	20
Obr. 2-7	Vnitřní kroužek – elektrokoroze (21)	20
Obr. 2-8	Vibrační koroze (21).....	21
Obr. 2-9	Mechanická metoda (8).....	23
Obr. 2-10	Zařízení pro indukční ohřev (8).....	23
Obr. 2-11	Testovací zařízení firmy Timken (23)	24
Obr. 2-12	Testovací zařízení axiálních ložisek FAG-FE8 (11).....	25
Obr. 2-13	Testovací zařízení PRONOSTIA (12).....	25
Obr. 2-14	Testovací zařízení válečkové (13)	26
Obr. 2-15	Testovací zařízení firmy Shaeffler (14)	27
Obr. 2-16	Zařízení pro testování soudečkových ložisek (15)	28
Obr. 2-17	Testovací zařízení SA67.....	28
Obr. 2-18	Testovací zařízení RAH (16)	29
Obr. 2-19	Testovací zařízení ZT (16).....	29
Obr. 2-20	Testovací zařízení T20-60nF (17).....	30
Obr. 2-21	Testovací zařízení na FSI VUT v Brně (7).....	30
Obr. 2-22	Zkušební zařízení pro válečková a jehlový ložiska (18).....	31
Obr. 2-23	Zkušební zařízení pro ložiska (19)	31
Obr. 4-1	Schéma první varianty	33
Obr. 4-2	Schéma druhé varianty	34
Obr. 4-3	Schéma třetí varianty	35

Obr. 5-1	Testovací zařízení	37
Obr. 5-2	Ložiskový domek: a) řez, b) 3d model.....	38
Obr. 5-3	Ložiskové těleso	38
Obr. 5-4	Spodní část tělesa.....	39
Obr. 5-5	Vrchní část tělesa.....	39
Obr. 5-6	Víka: a) víko1; b) víko2.....	40
Obr. 5-7	Hřídel	40
Obr. 5-8	Pouzdra a) testovací; b) podpůrná	41
Obr. 5-9	Uložení.....	42
Obr. 5-10	Hydraulický válec	42
Obr. 5-11	a) Siloměr; b) zatěžovací čep.....	43
Obr. 5-12	Patka s otvorem	44
Obr. 5-13	Stůl	44
Obr. 5-14	Kryt řemene	47
Obr. 5-15	Spojka KBK/EPK-19	48
Obr. 5-16	Hřídel podpůrného ložiskového domku	48
Obr. 5-17	Spodní upínací deska.....	49
Obr. 5-18	Vrchní upínací deska	49
Obr. 5-19	a) Snímač SITRANS LC300; b) škrticí ventil VRB; c) Ventil VZWP	50

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Nevýhody koncepčních řešení.....	35
Tab. 4-2	Výhody koncepčních řešení	36
Tab.5-1	Parametry elektromotoru.....	43
Tab.5-2	Vstupní výpočtové parametry	45

12 SEZNAM PŘÍLOH

Celková sestava

Příloha 1:	A0-S01	Testovací zařízení
Příloha 2:	A2-S01-01	Spodní deska
Příloha 3:	A4-S01-02	Malá řemenice
Příloha 4:	A3-S01-03	Velká řemenice
Příloha 5:	A4-S01-04	Podložka
Příloha 6:	A3-S01-05	Hřídel ložiskové jednotky
Příloha 7:	A4-S01-06	Svorník

Podsestava 1

Příloha 8:	A1-P01-S01	Stůl
Příloha 9:	A4-P01-01	Patka 2
Příloha 10:	A4-P01-02	Patka
Příloha 11:	A4-P01-03	Jekl 1
Příloha 12:	A4-P01-04	Jekl 2
Příloha 13:	A4-P01-05	Jekl 3

Podsestava 2

Příloha 14:	A3-P02-S01	Ochranný kryt
Příloha 15:	A3-P02-01	Ohyb
Příloha 16:	A4-P02-02	Plech krytu

Podsestava 3

Příloha 17:	A0-P03-S01	Ložiskový domek
Příloha 18:	A3-P03-01	Hřídel
Příloha 19:	A4-P03-02	Rozpěrný kroužek 1
Příloha 20:	A4-P03-03	Čep
Příloha 21:	A3-P03-04	Víko 1

Příloha 22:	A3-P03-05	Víko gufera
Příloha 23:	A3-P03-06	Víko 2
Příloha 24:	A1-P03-07	Domek – spodní
Příloha 25:	A1-P03-08	Domek – horní
Příloha 26:	A2-P03-09	Ložiskové těleso
Příloha 27:	A3-P03-10	Pouzdro test
Příloha 28:	A3-P03-11	Pouzdro podpora
 Příloha 29:	 Počítačový 3D model testovacího zařízení	